

ESTADO DEL ARTE DE LA PROGRAMACIÓN DEL MANTENIMIENTO DE LA
GENERACIÓN ENTRE LOS AÑOS 2008 Y 2017

JESSICA TATIANA VÉLEZ BETANCUR

SEBASTIAN RODRIGUEZ PINEDA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PEREIRA

2018

ESTADO DEL ARTE DE LA PROGRAMACIÓN DEL MANTENIMIENTO DE LA
GENERACIÓN ENTRE LOS AÑOS 2008 Y 2017

JESSICA TATIANA VÉLEZ BETANCUR

SEBASTIAN RODRIGUEZ PINEDA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniera e Ingeniero
Electricista

Directora

MARÍA VICTORIA RAMÍREZ MARTÍNEZ

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PEREIRA

2018

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado 1

Firma del jurado 2

Pereira, 5 abril de 2018

*Dedicada a nuestros padres, que son nuestro mayor apoyo en la vida y a nuestras familias,
por siempre estar en esos momentos en que más lo necesitamos.*

Agradecemos principalmente a Dios porque sin él esto no sería posible. A la Universidad Tecnológica de Pereira, por brindarnos herramientas tan valiosas como el acceso a la información, gracias al acceso a las bases de datos a las cuales se encuentra vinculada la universidad, se logró realizar este trabajo. A nuestra directora de trabajo de grado María Victoria Ramírez Martínez, por su dedicación, su paciencia y sobre todo por el apoyo que nos brindó en este proceso tan importante en nuestras vidas.

También, agradecemos a Dios por habernos permitido encontrarnos y conocernos, por la relación que hemos venido construyendo desde los últimos tres años, en los cuales nos hemos apoyado y acompañado en todo este proceso de formación y en nuestras vidas. Todo lo que hemos logrado hasta ahora no hubiese sido igual de no haber estado juntos. Y como no mencionar algo que tiene tanto valor sentimental para nosotros y que solo los dos sabemos su significado, L-105.

CONTENIDO

	Pag.
CONTENIDO	6
ÍNDICE DE FIGURAS	8
ÍNDICE DE TABLAS	9
ÍNDICE DE SIGLAS	10
RESUMEN	14
ABSTRACT	16
1. INTRODUCCIÓN	17
1.1. Estructura del trabajo de grado	17
1.2. Planteamiento del Problema	17
1.3. Justificación	18
1.4. Objetivos	21
1.4.1. Objetivo general	21
1.4.2. Objetivos específicos	21
2. MARCO REFERENCIAL	22
2.1. Generalidades	22
2.1.1. Mantenimiento eléctrico	22
2.1.2. Generación de energía eléctrica	23
2.1.3. Definición del estado del arte	24
2.2. Estado del arte	24
3. DISEÑO METODOLÓGICO	28
3.1. Bases de datos	28

3.2. Campos de clasificación	29
3.2.1. Tipo de artículo.....	30
3.2.2. Fuente	30
3.2.3. Procedencia de la publicación	31
3.2.4. Modelo matemático	31
3.2.5. Técnica o método de solución	32
3.2.6. Sitio web	32
3.2.7. Base de datos	32
3.2.8. Análisis de información y conclusiones	32
4. ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS	34
5. TRABAJOS FUTUROS.....	57
6. CONCLUSIONES.....	58
Bibliografía.....	60
ANEXO 1	64
ANEXO 2	65
Función objetivo	65
Restricciones.....	66
ANEXO 3	67

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Proceso de generación, transmisión y distribución de energía.	23
Figura 2. Esquema de selección de artículos	35
Figura 3. Anillo de porcentaje de artículos de cada base de datos.	36
Figura 4. Número de artículos por año de publicación.....	37
Figura 5. Diagrama de porcentajes según tipo de artículo.	38
Figura 6. Número de artículos por fuente de publicación.	40
Figura 7. Número de artículos publicados por autor.	42
Figura 8. Procedencia de artículos por país.	44
Figura 9. Anillo de procedencia de artículos por continente.	46
Figura 10. Modelo matemático por número de artículos	49
Figura 11. Diagrama de software empleado en los artículos.....	54

ÍNDICE DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Número de artículos publicados por autor.....	41
Tabla 2. Países de procedencia de los artículos ubicados por continente.....	46
Tabla 3. Técnicas o métodos de solución usados en los artículos.....	53
Tabla 4. Técnica, método o modelo matemático de solución codificado en cada <i>software</i> . 56	
Tabla 5. Información de algunas centrales de generación de Colombia.	64

ÍNDICE DE SIGLAS

ABC (*Artificial Bee Colony*): Colonia artificial de abejas.

ADPSO (*Adaptive Discrete Particle Swarm*): Enjambre adaptable de partículas discretas

ALO (*Ant Lion Optimizer*): Optimizador de hormiga león.

ANN (*Artificial Neural Network*): Red neuronal artificial.

ARIMA (*Autoregressive Integrated Moving Average*): Modelo autorregresivo integrado de media móvil.

CBM (*Condition Based Maintenance*): Mantenimiento basado en la condición.

CCP (*Chance Constrained Programming*): Programación limitada por azar.

CDF (*Cumulative Distribution Function*): Función de Distribución Acumulativa

CSA (*Current Signature Analysis*): Análisis de firma actual.

DE (*Differential Evolution*): Evolución diferencial.

DP (*Dynamic Programming*): Programación dinámica.

DPSO (*Discrete Particle Swarm Optimization*): Optimización discreta de enjambre de partículas.

EAM (*Enterprise Asset Management*): Gestión de activos empresariales.

EEM (*European Energy Market*): Mercado energético europeo.

EPVA (*Enhanced Park's Vector Approach*): Enfoque vectorial de parque mejorado.

FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*): Modos de falla y análisis de efectos.

FTA (*Fault Tree Analysis*): Análisis de árbol de fallas.

GA (*Genetic Algorithm*): Algoritmo genético.

GAMS (*General Algebraic Modeling System*): Sistema de modelado algebraico general.

GMS (*Generation Maintenance Scheduling*): Programación de mantenimiento de la generación.

GPIM (*Generalized Proportional Intensity Model*): Modelo de intensidad proporcional generalizada.

GSOMP (*Group Search Optimizer with Multiple Producers*): Optimizador de búsqueda grupal con múltiples productores.

GSP (*Generation Scheduling Problem*): Problema de programación de generación.

HCT (*Hill Climbing Technique*): Técnica de escalada en la colina.

HPP (*Homogeneous Poisson Processes*): Procesos de Poisson homogéneos.

IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*): Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos.

IMS (*Integrated Maintenance Scheduling*): Programación de mantenimiento integrado.

KPI (*Key performance indicators*): Indicadores clave de rendimiento.

LCC (*Life Cycle Cost*): Costo del ciclo de vida.

LCM (*Life Cycle Management*): Gestión del ciclo de vida.

LHS-MC (*Latin Hypercube Sampling Monte Carlo*): Muestreo de hipercubos latinos de Monte Carlo.

LI (*Lambda-Iteration*): Iteración lambda.

LINGO (*LINEar Generalize Optimizer*): Optimizador de generalización lineal.

LRC (*Levelized Reserve Capacity*): Capacidad de reserva nivelada.

MAS (*Multi-Agent Systems*): Sistemas multi-agente.

MDPSO (*Modified Discrete Particle Swarm Optimisation*): Optimización de enjambre de partículas discretas modificado.

MIBLP (*Mixed Integer Bi-Level Linear Programming*): Programación lineal de dos niveles mixtos.

MILP (*Linear Programming of Mixed Integers*): Programación lineal de enteros mixtos.

MIP (*Mixed Integers Programming*): Programación de enteros mixtos.

MIQP (*Integer Mixed Quadratic Programming*): Programación cuadrática mixta entera.

MGA (*Modified Genetic Algorithm*): Algoritmo genético modificado

MPC (*Model Predictive Control*): Control predictivo del modelo

MPEC (*Mathematical Program with Equilibrium Constraints*): Programa matemático con restricciones de equilibrio

NAPS (*North American Power Symposium*): Simposio de energía de América del norte.

NHPP (*Non-Homogeneous Poisson Processes*): Procesos de Poisson no homogéneos.

NSGA (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*): Algoritmo genético de clasificación no dominado.

OPF (*Optimal Power Flow*): Flujo de potencia óptimo.

PCS (*Plant Computer System*): Sistema informático de planta.

PDR (*Projected Disjunctive Reformulation*): Reformulación disyuntiva proyectada.

PL (*Linear Programming*): Programación Lineal.

PM (*Preventive Maintenance*): Mantenimiento preventivo.

PMAPS (*Probabilistic Methods Applied to Power Systems*): Métodos probabilísticos aplicados a los sistemas de potencia.

PRSA (*Parallel Refined Simulated Annealing*): Recocido simulado refinado paralelo.

PSO (*Particle Swarm Optimization*): Optimización de enjambre de partículas.

RAMS (*Reliability and Maintainability Symposium*): Simposio de confiabilidad y mantenibilidad

RCM (*Reliability Centered Maintenance*): Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad.

SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*): Supervisión, Control y Adquisición de Datos.

SIN: Sistema Interconectado Nacional.

SMDP (*Semi-Markov Decision Process*): Proceso de Decisión Semi-Markoviano.

SVC (*Support Vector Clustering*): Agrupación de vectores de soporte.

SVM (*Support Vector Machine*): Máquina de vector de soporte.

TLBO (*Optimization based on teaching and learning*): Optimización basada en enseñanza y aprendizaje.

TPP (*Thermal Power Plants*): Planta de energía térmica.

UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*): Vehículos aéreo no tripulado.

UPEC (*Universities Power Engineering Conference*): Conferencia de universidades de ingeniería de energía.

VBA (*Visual Basic for Applications*): Visual Basic para Aplicaciones.

VCN (*Vibration condition monitoring*): Monitoreo de la condición de vibración.

VNS (*Variable Neighborhood Search*): Búsqueda de vecindad variable.

VSA (*Voltage Signature Analysis*): Análisis de firma de voltaje.

RESUMEN

Este es un trabajo de revisión del estado del arte sobre la programación del mantenimiento de las unidades de generación, que pertenece al área del planeamiento de sistemas eléctricos. El estado del arte es básicamente una investigación de la investigación con el propósito de facilitar el estudio sobre un tema específico para ser una base para futuras investigaciones sobre el tema abordado, en este caso de la programación del mantenimiento de la generación o GMS (*Generation Maintenance Scheduling*) de sus siglas en inglés. Para la elaboración de este documento, fue necesario realizar una tabla en el *software* Excel y, la búsqueda y descarga de algunos artículos de revistas y conferencias de tres bases de datos seleccionadas previamente, a las cuales se encuentra suscrita la Universidad Tecnológica de Pereira. Dicha tabla fue llamada base de datos. En ella se definieron algunos campos de clasificación considerados como los más importantes, estos campos fueron: el nombre del artículo, tipo de artículo, fuente en la cual fue publicado cada artículo, año de publicación, autores, procedencia, modelo matemático, técnica o método de solución, el *software* con el cual se soluciona el modelo en caso de que exista y, se tiene también, el link de donde fueron descargados los artículos, que además se pueden encontrar en el anexo 3 de este documento con su respectivo nombre.

En el análisis de datos y resultados, se realizaron gráficos y tablas que finalmente son el propósito de este trabajo de investigación. En ese punto, básicamente se encuentra la herramienta que permite analizar lo que se ha estudiado en todos aquellos artículos publicados en un periodo de 10 años, comprendidos entre enero de 2008 y diciembre de 2017. Dicha herramienta se pone a disposición del grupo de planeamiento de sistemas eléctricos de la Universidad Tecnológica de Pereira, como también para todos aquellos autores que deseen realizar investigaciones a futuro en este tema o en otros temas que de una u otra forma tienen relación con la programación del mantenimiento de la generación. Finalmente, se concluye respecto a los datos obtenidos y se muestra de manera breve qué otros trabajos se pueden realizar tomando como base este trabajo de grado. Algunas personas pueden llegar a confundir las diferentes técnicas que se utilizan en la literatura por parte de los autores con los modelos matemáticos utilizados para representar en manera de ecuaciones el problema

específico a resolver, es por esto, por lo que en este documento se hace una breve descripción tanto de los modelos como de las técnicas utilizadas en los artículos revisados para este trabajo de grado. Además, se presentan algunas generalidades con conceptos básicos respecto al tema que son necesarios para lograr una mejor comprensión del tema de la programación del mantenimiento de la generación.

ABSTRACT

This work is a state of the art review on generation maintenance scheduling, pertaining to the area of the electric power systems planning. The state of the art is basically a research of research with the purpose of facilitating the study on a specific topic to be a base for future research on the subject addressed, in this case, the generation maintenance scheduling (GMS) problem. For the preparation of this document, it was necessary to create a table in the Excel software and to search and download some journal papers and conferences from three previously selected databases to which the Technological University of Pereira is subscribed. This table was called a database, it defines the most important fields as follows: the name of the paper, type of paper, source in which each paper was published, year of publication, authors, origin, mathematical model, technique or solution method, the software with which the model is solved, if it exists and, also, the link from where the papers were downloaded, which can also be found in Annex 2 of this document with its respective name.

In the analysis of data and results, graphs and tables were made that are finally the purpose of this research work. At that point, basically is the tool that allows analyzing what has been studied in all those papers published in a period of 10 years, between January 2008 and December 2017. This tool is made available to the planning group of electrical systems of the Technological University of Pereira, as well as for all those authors who wish to carry out future research in this subject or in other topics that in one way or another are linked to the generation maintenance schedule. Finally, it is concluded with respect to the data obtained and it is briefly shown that other works can be carried out based on this degree work. Some people may confuse the different techniques used in the literature by the authors with the mathematical models used to represent the specific problem to solve in the form of equations, that is why, in this document, a brief contextualization of both models and techniques used in the papers that were downloaded for satisfactory purposes of this degree work. In addition, some generalities are presented with basic concepts regarding the subject that are necessary to achieve a better understanding of the theme of the generation maintenance programming.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Estructura del trabajo de grado

Este trabajo se encuentra fragmentado en 6 capítulos de la siguiente manera: En el capítulo 1, se tiene lo pertinente a la introducción del trabajo y se puede encontrar su estructura, el planteamiento del problema de la programación del mantenimiento de la generación, justificación y, objetivo general y específicos. En el capítulo 2, se tiene el marco referencial, el cual está conformado por generalidades en donde se encuentran algunos conceptos básicos necesarios para entrar en el contexto del fin de este trabajo, también, se tiene el estado del arte. Posteriormente, se tiene el capítulo 3, en donde se encuentra el diseño metodológico seguido por la elaboración de la tabla base de este trabajo. En el capítulo 4, se encuentra el análisis de datos y sus resultados de manera minuciosa. En el capítulo 5, se evidencian algunas conclusiones y finalmente, en el capítulo 6 se esbozan algunos trabajos venideros.

1.2. Planteamiento del Problema

La función básica de un sistema eléctrico es satisfacer en su totalidad la demanda de energía, operando al menor costo y con las menores pérdidas posibles. Para garantizar la confiabilidad del sistema, se debe realizar planeamiento, lo que en el contexto de los sistemas eléctricos se entiende como el proceso a través del cual se definen acciones que promueven la diversidad y selección eficiente de los recursos que requiere el sistema para operar adecuadamente en el futuro. Algunos de los temas que abarca el planeamiento de sistemas eléctricos son la inversión, operación y mantenimiento de la generación, distribución y transmisión [1]. La inversión se basa en el capital que se requiere para la construcción de centrales de generación y las líneas de transmisión. En Colombia, el Sistema Interconectado Nacional (SIN) cuenta con diversos recursos de generación, el informe dado por [2] para el año 2016 de la generación por cada tipo de tecnología fue: centrales hidráulicas con un porcentaje de 67,1% lo cual equivale a una generación de 44.246,10 MW, centrales térmicas 27% equivalente a 17.790,10 MW, plantas menores (recursos hidráulicos, térmicos y central eólica) con un

porcentaje de 4,8% y una generación de 3.193,10 MW, cogeneradores 0,9% es decir 600MW, autogeneradores los cuales apenas se ingresaron al sistema ese mismo año con una participación del 0,2% y 111 MW. Es bastante notorio que en general la demanda energética en Colombia es suplida con las centrales hidráulicas y térmicas (94,1%). Hasta el momento, las energías renovables tienen muy poca participación en el mercado, se espera que con el paso de los años aumenten su capacidad. Por otro lado, la operación se basa en la aplicación de diferentes métodos existentes para realizar un despacho hidrotérmico óptimo. Por último, se tiene el mantenimiento, el cual es ampliamente usado en generación, distribución y transmisión. Este trabajo se enfoca en la programación del mantenimiento de la generación.

La generación es una actividad continua en la cual los equipos se ven expuestos a largos periodos de funcionamiento, esto conlleva a una mayor probabilidad de averías, desgaste de piezas, corrosiones, entre otras. De allí la necesidad de realizar regularmente mantenimiento preventivo y predictivo para así evitar fallas imprevistas que obligan a realizar una acción de mantenimiento correctivo. En consecuencia, el mantenimiento programado tiene como objetivo prevenir al máximo la escasez de energía y extender la disponibilidad de los equipos [3]. Además de reducir costos de operación ya que los costos de un mantenimiento correctivo son elevados en comparación con los otros tipos de mantenimiento.

1.3. Justificación

El principal fin de la realización de este trabajo es cumplir con el requisito para optar al título de ingeniera e ingeniero electricista. De igual forma, no existen revisiones recientes en las bases de datos (IEEE Xplore, Scince Direct y Springer Link) acerca del estado del arte propiamente en la programación del mantenimiento de la generación, lo cual es necesario para futuras investigaciones sobre este tema tan importante y complejo en el área del planeamiento de sistemas eléctricos. Es de resaltar que, este trabajo no solo ayudará a futuros investigadores en la programación del mantenimiento de la generación, sino que aportará en el acople de otros temas como el despacho hidrotérmico, la programación del mantenimiento de la transmisión y el compromiso de la unidad mejor conocido como “*Unit Commitment*”.

Se requiere el levantamiento del estado del arte de la programación del mantenimiento de la generación entre enero de 2008 y diciembre de 2017. Se necesita entregar una herramienta para facilitar posteriores estudios a futuros investigadores, como es el caso del Grupo de Planeamiento de Sistemas Eléctricos de la Universidad Tecnológica de Pereira, el cual durante años se ha especializado en el planeamiento de la transmisión, pero en los últimos años ha incursionado en temas como el despacho hidrotérmico y el planeamiento de la generación. El presente proyecto se convierte en una herramienta que fortalecerá el estudio de la programación del mantenimiento de la generación. Este trabajo estará a la mano de cualquier persona interesada en el tema, también, para aquellos investigadores que requieran detalles sobre cualquiera de las publicaciones aquí analizadas, encontrarán la información concentrada en una sola fuente organizada y clasificada, al igual que encontrarán la dirección electrónica desde la cual podrán descargar el artículo completo (ver anexo 3).

Por otro lado, este trabajo de grado evitará que futuros investigadores puedan llegar a caer en plagio por desconocimiento de trabajos y artículos ya existentes, las personas que estén interesadas en el tema podrán estar actualizadas acerca de las soluciones que se han dado a este problema en los últimos 10 años y también contribuye a una planeación correcta del mantenimiento de la generación. Por ejemplo, en Colombia es necesario tener un mantenimiento en la generación adecuado debido a los cambios hidrológicos que se ven reflejados por los fenómenos climatológicos. Si una máquina llegara a fallar en una situación de esas, las consecuencias serían muy graves. Lo ideal es evitar acciones correctivas y más en situaciones de crisis, como por ejemplo con lo ocurrido en el año 2016, cuando el país se vio gravemente afectado y estuvo a punto de llegar a hacer racionamiento energético, esto ocurrió debido a que aparte del fenómeno del Niño (sequía en los embalses), un cortocircuito ocasionó daños en los cables que transportan la energía hasta la subestación de Guatapé, motivo por el cual la central hidroeléctrica Guatapé salió de funcionamiento, haciendo que las centrales San Carlos, Jaguas y Playas también dejaran de funcionar debido a que las unidades de estas centrales son alimentadas con las aguas con las que genera la central Guatapé. Este fue un hecho bastante preocupante al tenerse en cuenta que en la central Guatapé para ese año se generaba el 4% de la energía del país y la central San Carlos, una de las más grandes, generaba el 10% de la energía. Este daño en la central de Guatapé tuvo un

tiempo aproximado de reparación de 19 semanas [4]. Aparte de esto, una de las unidades de la central Termoflores estaba fuera de servicio debido a un mantenimiento preventivo cuando ocurrió un daño en una de las turbinas de combustión, haciendo que su capacidad se redujera en un 37,7%. Es debido a esto que es de vital importancia una adecuada programación del mantenimiento de la generación, para este suceso las centrales térmicas debían estar en perfectas condiciones puesto que tuvieron que entrar en funcionamiento casi a su máxima capacidad [5]. El tiempo aproximado de reparación de la turbina fue de cuatro semanas [6]. Información respecto a la ubicación geográfica, capacidad instalada, tipo de central y tipo de combustible de las centrales hidroeléctricas y térmica anteriormente mencionadas se puede observar en el anexo 1 de este documento, dicha información es basada en la referencia [7].

Con el paso de los años, contar con el servicio de electricidad se ha vuelto cada vez más fundamental para el diario vivir, por ejemplo, en los hospitales, allí muchas vidas podrían perderse por falta de electricidad, como lo ocurrido el 14 de febrero del presente año en Venezuela, donde debido a una falla eléctrica seis bebés que se encontraban conectados a ventilación mecánica murieron al no entrar en funcionamiento una planta de emergencia porque se encontraba dañada. Aunque este suceso pasó recientemente, lo que se ha buscado desde años atrás con el gran crecimiento de demanda de energía es poder contar con un servicio ininterrumpido y de buena calidad, pero para poder lograr esto es necesario que los equipos y las máquinas se encuentren en óptimas condiciones.

Finalmente, existen algunos vacíos en la literatura respecto al tema propuesto dado que no se cuenta con una revisión del estado del arte que agrupe todo lo publicado durante el período de análisis escogido, que aglutine los documentos publicados por estas tres destacadas librerías digitales ni en la Universidad Tecnológica de Pereira en particular ni en la literatura especializada en general. Esto podría explicarse dentro de la UTP porque el énfasis en los estudios de planeamiento ha estado en la transmisión y no en la generación. Así mismo, en las diferentes herramientas de búsqueda se pueden encontrar algunas investigaciones similares, pero enfocadas en años diferentes y en bases de datos distintas a las utilizadas para este trabajo.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Facilitar una herramienta importante en la programación del mantenimiento de la generación para futuros estudios que requieran de una base sólida cómo será la presentada en este trabajo de grado.

1.4.2. Objetivos específicos

- Establecer las bases de datos necesarias para la búsqueda de la información.
- Identificar en las bases de datos anteriormente establecidas las palabras clave.
- Clasificar los campos de la información a través de la herramienta Excel gracias a que ésta presenta una facilidad y practicidad en la organización de la información.
- Buscar y descargar los artículos de revistas y conferencias acordes al tema de este trabajo de grado.
- Analizar la información anteriormente encontrada y elaborar las conclusiones pertinentes.
- Desarrollar el documento final.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1. Generalidades

2.1.1. Mantenimiento eléctrico

Se denomina mantenimiento eléctrico el conjunto de acciones periódicas a las cuales es sometida una máquina con el fin de corregir posibles daños, mantener el equipo en óptimas condiciones o prevenir futuras intervenciones que conlleven a parar la producción o el funcionamiento normal y eficiente de la máquina. Las definiciones dadas a continuación sobre los tipos de mantenimiento eléctrico que existen son basadas de la referencia [8], dichas definiciones son:

- **Mantenimiento rutinario:** es un control que se hace diariamente, mediante el cual se supervisa visualmente el funcionamiento de las máquinas, equipos o instalaciones en servicio, se toman registros de posibles anomalías, se ajustan tornillos, se hace lubricación y limpieza tanto de los equipos como de las áreas de mantenimiento.
- **Mantenimiento correctivo:** se aplica cuando se presenta alguna falla o avería en una máquina, motivo por el cual tuvo que suspenderse su funcionamiento. En estos casos, lo ideal es aplicar el mantenimiento correctivo lo más pronto posible.
- **Mantenimiento programado:** es un mantenimiento controlado y sistematizado basado en la falta de fiabilidad de una máquina o equipo, donde se tiene en cuenta la cantidad de horas de funcionamiento.
- **Mantenimiento preventivo:** su finalidad es la de reducir posibles fallas futuras, detectarlas o eliminar riesgos, se lleva a cabo mediante inspecciones por medio de las cuales se reemplazan componentes de la máquina de ser necesario. Este tipo de mantenimiento es el más usado.
- **Mantenimiento predictivo:** es la aplicación de una serie de actividades que buscan conocer las fallas futuras del equipo o la máquina, realizando inspecciones con la máquina o equipo en funcionamiento y poder analizar adecuadamente su comportamiento y rendimiento.

2.1.2. Generación de energía eléctrica

Los sistemas eléctricos de potencia están compuestos por un conjunto de elementos, los cuales tienen la tarea de generar, transmitir y distribuir la energía eléctrica. En la figura 1, se observa con claridad el proceso mediante el cual la energía eléctrica es llevada desde las centrales generadoras, hasta los centros de carga. En las centrales generadoras, se convierte la energía potencial en energía eléctrica, entre las cuales se encuentran centrales hidroeléctricas, térmicas, eólicas, biomasa, geotérmicas, nucleares, fósiles, etc. Con el pasar de los años, se ha evidenciado el buen funcionamiento de algunas centrales de generación térmica e hidráulica, gracias a los estudios que por tantos años se han llevado a cabo para analizar el comportamiento de estas centrales. Estas energías son conocidas como energías convencionales, siendo las fuentes más comunes en el mundo para producir energía eléctrica. Sin embargo, hoy en día, se encuentra el auge de las energías renovables o también llamadas energías limpias, obtenidas de fuentes naturales “inagotables” como las centrales de generación de energía eólica, solar, mareomotriz y geotérmica. De las energías renovables, se puede destacar su importancia debido a los efectos mínimos en el medio ambiente comparadas con otras fuentes de energía, pero también, se puede ver que por ser tratados hace tan poco tiempo no hay las suficientes bases para que funcionen mejor que las energías tradicionales.

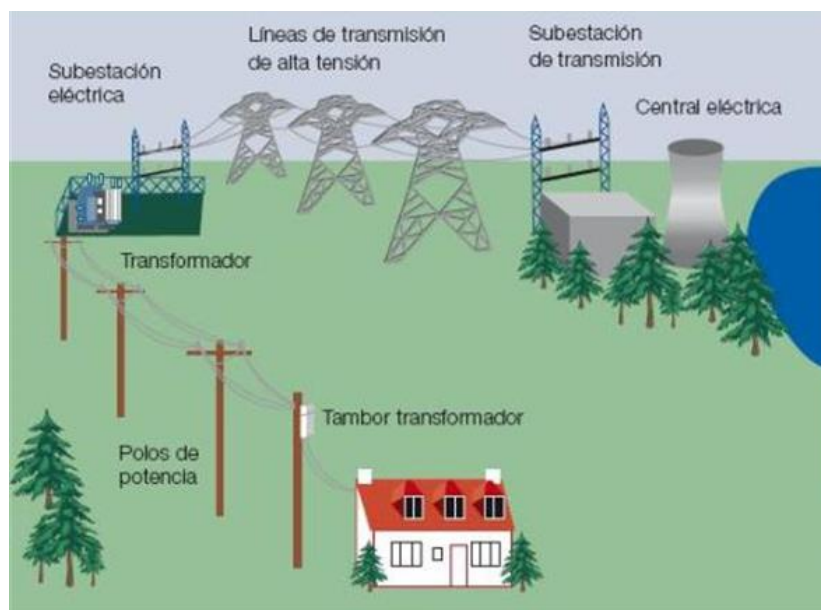


Figura 1. Proceso de generación, transmisión y distribución de energía [9].

2.1.3. Definición del estado del arte

El estado del arte es un estudio que se hace para analizar y recopilar información respecto a un área o asunto específico. El objetivo es conocer las investigaciones y trabajos que ya fueron realizados anteriormente respecto al tema de interés, esto es importante porque sirve como base para nuevos proyectos, nuevas soluciones o nuevos estudios en área de interés. La implementación del estado del arte nace desde los años 80, especialmente para temas relacionados con las ciencias sociales, se utilizaba para clasificar información y a partir de esto se denominó una investigación de la investigación, la cual sigue una metodología basada en tres pasos: Contextualización, clasificación y categorización [10].

2.2. Estado del arte

Existe gran variedad de métodos y modelos matemáticos en la literatura para la programación del mantenimiento de la generación o GMS (*Generation Maintenance Scheduling*). Durante muchos años se ha venido estudiando cómo obtener una programación del mantenimiento oportuno, el cual juega un papel importante reduciendo las averías y evitando costosos cierres de producción debido a que siempre se busca tener una mayor confiabilidad de las plantas de energía y las líneas de transmisión para poder suplir la demanda [11].

Básicamente, lo que se busca a continuación es poder analizar los avances que se han tenido en el problema de la programación del mantenimiento de la generación, para esto, lo que se hizo fue investigar algunos de los primeros y los últimos trabajos realizados. Se encontró que, los primeros trabajos realizados referentes al tema y publicados en la base de datos IEEE Xplore son de los años setenta y ochenta, es de principal interés esta base de datos debido a que es la que más cuenta con artículos publicados respecto al problema planteado.

En 1972, W. R. Christiaanse, et al, crearon una técnica para la programación del mantenimiento automatizada teniendo en cuenta que las centrales de generación con el pasar del tiempo iban a ir aumentando en tamaño, número y complejidad, lo cual requería una mejora en la programación del mantenimiento, puesto que los cambios ya mencionados implicarían aumento en los costos operativos de las plantas generadoras. Pensaban en la importancia de registrar e informar los horarios del mantenimiento en un programa de

computadora y así facilitar el acceso a la información para la toma de decisiones y reducir la ardua labor que tenían los encargados de preparar los horarios y mantener los registros [12].

En 1975, J. F. Dopazo, et al, resuelven el problema de programación del mantenimiento del generador implementando un robusto método de programación lineal de enteros 0-1, los autores mencionan que en trabajos anteriores a ese año se había manifestado que tal problema no podría ser resuelto con programación de enteros, sin embargo, ellos pudieron presentar una solución para crear horarios óptimos de mantenimiento del generador [13].

En 1982, el autor Zia A. Yamayee, presenta una revisión del estado del arte realizando una encuesta exhaustiva teniendo en cuenta las funciones objetivo, técnicas estocásticas y determinísticas, y optimización y técnicas heurísticas. Además, el autor presenta una revisión crítica de las terminologías y características de importancia usadas en el problema de la programación del mantenimiento de la generación. Por último, plantea que se presentan deficiencias en las metodologías usadas en ese tiempo y que, en sí, el problema de programación del mantenimiento no había sido resuelto, se encontraba estudiando la opción de aplicar programación matemática avanzada y metodologías factibles, sin embargo, en el artículo no mostró resultados obtenidos, el autor menciona que, “Se requiere mantenimiento preventivo para todos los equipos de generación a fin de reducir las posibilidades de escasez de capacidad y mejorar la disponibilidad general de dichas unidades” [14]. Dicho esto, un año después, en 1983, el mismo autor en compañía de otros dos autores, publicaron un método óptimo de programación de mantenimiento preventivo, usando como técnica de solución la programación dinámica, teniendo en cuenta la fiabilidad y el costo total del sistema, debido a que el costo operativo de un sistema eléctrico se ve altamente afectado por los cortes de mantenimiento de los generadores [15]. Estos dos artículos sirven para resaltar la importancia de realizar una revisión del estado del arte respecto al área de interés. Con el trabajo realizado por Zia A. Yamayee en 1982, el autor pudo analizar y estudiar las soluciones que se habían propuesto al problema de la programación del mantenimiento de la generación y al ya tener conocimiento de las falencias que se observaron anteriormente, en 1983 pudo publicar una óptima solución al problema. Básicamente, eso es lo que se busca con la realización de este trabajo de grado, que futuros investigadores tengan conocimiento de las técnicas que se han implementado para dar solución al problema en los últimos diez años y

que al tener como base este trabajo, puedan proponer nuevas soluciones o presentar mejoras y nuevas investigaciones.

En los últimos años, los métodos usados para darle solución al problema de la programación del mantenimiento de la generación han avanzado mucho y cada vez se implementan nuevos métodos o se realizan mejoras significativas a los métodos existentes. Por ejemplo, las técnicas de solución empleadas en los artículos explicados a continuación, correspondientes a los años 2014 y 2015 de la base de datos IEEE Xplore y del año 2018 de la base de datos Science Direct.

“En un entorno de mercado de sistemas de potencia, cada productor persigue su máximo beneficio mientras que el operador del sistema independiente está a cargo de la fiabilidad del sistema y la minimización del costo total de generación al generar la programación de mantenimiento de generación (GMS)” [16]. El mantenimiento puede ser programado dependiendo del objetivo al que se quiera llegar, con esto se quiere decir que pueden existir diferentes metas, como por ejemplo minimización del tiempo del mantenimiento, minimización de costos en la ejecución del mantenimiento, minimización de pérdidas en el caso de las líneas de transmisión, entre otros. Además, se pueden encontrar modelos en los que la programación del mantenimiento se realiza con muchos objetivos, estos modelos son llamados como multiobjetivo, pero también, existen algunos modelos planteados en los que solo se encuentra un único objetivo, estos son llamados como monobjetivo.

En el año 2015, los autores de [16] plantean un modelo multiobjetivo en un entorno de mercado en el cual los objetivos son los beneficios de cada productor, la fiabilidad del sistema y el costo total de generación. Por otro lado, en el año 2014 en [17], se estudia específicamente el mantenimiento preventivo (PM), en el cual se propone un nuevo mecanismo competitivo basado en un algoritmo genético modificado (MGA) para minimizar el tiempo de programación del mantenimiento, lo cual aporta a la mejora de la calidad de la energía en las estaciones de generación y a reducir su costo.

En febrero del presente año, J. Eygelaar et al, publicaron un artículo en el cual hacen énfasis en las fallas imprevistas de las unidades de generación, plantean que el mantenimiento de dichas unidades no se implementa adecuadamente debido a la alta demanda de energía y a la

baja capacidad del sistema. Ellos proponen un nuevo criterio de programación que busca maximizar la probabilidad de que las unidades de generación no fallen entre el tiempo de puesta en servicio de su último mantenimiento previo hasta el próximo mantenimiento programado. La función objetivo del modelo planteado es exponencial, la cual se linealizó y se solucionó mediante el *software* Cplex [18].

Este mismo año, también en febrero, Peyman Mazidi et al, proponen un modelo de programación del mantenimiento de la generación en dos niveles para un sistema de energía desregulado, donde se busca la maximización de ganancias económicas de la empresa de generación. Utilizaron las condiciones de optimalidad de Karush-Kuhn-Tucker para convertir el modelo de dos niveles en un problema lineal de enteros mixtos de un nivel y para la solución final obtuvieron el equilibrio de Nash, lo cual es una teoría de juegos [19].

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Bases de datos

En un principio se escogieron las fuentes para el levantamiento del estado del arte de la programación del mantenimiento de la generación. Se definieron como fuentes tres bases de datos suscritas por la Universidad Tecnológica de Pereira: IEEE Xplore, Science Direct y Springer Link. Estas fueron seleccionadas principalmente por ser las bases de datos en las que se encuentra más información acerca de temas de ingeniería y para propósitos de este trabajo en el área de planeamiento de sistemas eléctricos. Igualmente, se pudo haber escogido más bases de datos, pero por cuestiones de tiempo se delimitó la búsqueda de los artículos en las tres bases de datos antes mencionadas. Dado que se pretendía realizar una revisión detallada de los artículos, se requería acceso al texto completo. Las bases de datos mencionadas cumplen con esa característica. Es de destacar el aprovechamiento al máximo de la facilidad al acceso de la información brindada por la Universidad Tecnológica de Pereira, ya que sin estas bases suscritas no hubiese sido posible la realización de este trabajo de grado porque el acceso a la mayoría de estos artículos no es gratuito para todas las personas. Posteriormente, se inició la búsqueda de los artículos en las tres bases de datos con las palabras clave *Generation Maintenance Scheduling* (GMS) que en español significa programación del mantenimiento de la generación. Para realizar la búsqueda y que ésta no fuera tan dispendiosa se establecieron unos filtros en cada base de datos. A continuación, se presentarán los filtros utilizados en las bases de datos:

- **Science Direct:** El número total de artículos y conferencias encontrados con el siguiente filtro fue de 433.

Years: 2008 – 2017

Article type: Review articles and research articles

Publication type: Energy procedia and Procedia engineering

Acces type: Open Access

- **Springer Link:** El número total de artículos encontrados con el siguiente filtro fue de 1.158 artículos y 534 conferencias.

Data published: years between 2008 and 2017.

Content type: Article and Conference paper.

Discipline: Engineering

Include Preview-Only content: Deselect

- **IEEE Xplore:** El número total de artículos encontrados con el siguiente filtro fue de 348.

Range: 2008 – 2017

Filters applied: Journals and Magazines, conferences.

Como bien se sabe, estas bases de datos se encuentran en inglés, debido a esto se reportan los filtros exactamente como se utilizaron al momento de la búsqueda. Así mismo, se encontró que en las bases de datos Springer Link y Science Direct era necesario realizar la búsqueda sin estos filtros, ya que algunos de los artículos no contaban con las palabras clave en los títulos, pero al momento de leer el *abstract* y la introducción se llegó a la conclusión de que estos hablaban sobre el tema de este trabajo y fueron agregados después de su respectiva lectura y análisis. En Science Direct, en la búsqueda sin filtro de *Publication tittle* se obtuvo un total de 2.512 artículos, de igual forma, en Springer Link, en la búsqueda sin filtro de *discipline* 7.607 artículos y 1.991 conferencias. De todos los artículos que aparecieron en las bases de datos con las palabras clave, se escogieron los que tenían relación directa con el problema planteado, y en total se obtuvo una descarga de 135 artículos procedentes de las tres bases de datos mencionadas.

3.2. Campos de clasificación

Se creó una tabla en la que se plasma toda la información obtenida de los 135 artículos descargados de las bases de datos antes mencionadas, toda esta información fue recolectada

con el fin de clasificar los artículos con algunos ítems como nombre de los autores, procedencia del artículo, nombre del artículo, tipo de artículo, fuente, año de publicación, técnica o método de solución, modelo matemático, *software* empleado, sitio web y obviamente a la base de datos en donde se encuentra el artículo.

3.2.1. Tipo de artículo

En este campo de acción se deben clasificar los artículos según la estructura con que estos hayan sido realizados por los autores, entre estos podemos encontrar artículos de revista los cuales son artículos seriados que pueden tener contenido de investigación original, artículos de revisión, informes cortos o cartas, estudios de caso y metodologías. Se dice que es seriada porque se pueden retomar temas de publicaciones que se han realizado en lapsos de tiempo cortos, medianos y largos [20]. Una conferencia, es un artículo publicado en las memorias de una reunión científica y es producto de una investigación original y considerada como de alto nivel, la calificación de su calidad es rigurosa y es realizada por personas expertas en el tema [21]. Por otro lado, en este campo de clasificación se pueden encontrar los artículos de investigación, que es un estudio acerca de un fenómeno o hecho y puede ser físico o social. Las principales conclusiones se exponen de manera ordenada en un documento. El estudio se puede basar en documentos existentes y/o en encuestas y entrevistas, de igual forma se basan en comunicar los resultados obtenidos de proyectos de investigación científica, tecnológica, educativa, pedagógica o didáctica y dar a conocer el proceso para la realización del artículo [22]. Finalmente, los artículos de revisión son un tipo de artículo científico que sin ser original recopilan información sobre algún tema en específico [23]. Se puede decir que este trabajo de grado es una combinación entre un trabajo de investigación y de revisión ya que tiene características de ambos tipos.

3.2.2. Fuente

Esta casilla hace referencia al nombre de la revista, congreso o conferencia donde fue publicado el artículo. Este campo de clasificación es importante a fin de establecer cuáles

son las revistas o congresos que más publican acerca de la programación del mantenimiento de la generación alrededor del mundo.

3.2.3. Procedencia de la publicación

La procedencia de publicación hace referencia a la ubicación geográfica de la universidad o instituto de investigación al que pertenecen los autores de cada artículo, a pesar de que inicialmente se había establecido la procedencia como el lugar de nacimiento del autor o autores, se pensó que esta labor era muy dispendiosa y podía llevar demasiado tiempo. Por lo tanto, se escogió la ubicación geográfica de la universidad o instituto. En varias oportunidades, se encontró que, por ejemplo, un mismo artículo fue realizado por autores que colaboraron en el mismo artículo desde diferentes países del mundo.

3.2.4. Modelo matemático

Los procesos y sistemas en ingeniería son demasiado complejos porque se debe recurrir a idealizaciones y aproximaciones para poder ser resueltos, es por esto por lo que se recurre al modelado, que sirve para implicar ciertos problemas con altos grados de dificultad representándolos en términos de sistemas de ecuaciones. Ahora bien, el modelado matemático es uno que representa el desempeño y comportamiento de un sistema cualquiera en términos de ecuaciones matemáticas obteniendo un resultado cuantitativo. Las ecuaciones que se utilizan en el modelado pueden ser algebraicas, diferenciales ordinarias, diferenciales parciales, integrales o combinación de algunas de estas. En algunos de los artículos analizados, la casilla del modelo matemático se encuentra vacía, esto puede ser debido a que los autores no especificaban el modelo matemático empleado o simplemente, porque no era necesario el uso de un modelo en sus trabajos. Muchos problemas en la vida real pueden ser representados matemáticamente si cumplen con ciertos criterios necesarios para ello. En un problema específico de optimización matemática, como el que nos ocupa en esta revisión se pueden encontrar algunas funciones objetivo como reducir las horas del mantenimiento, también, se tienen variables de decisión cuantificables sobre las que se ejerce control.

Además, se tienen las restricciones que son unos valores que limitan las variables de decisión [24].

3.2.5. Técnica o método de solución

En este campo se buscó la clasificación de las técnicas o métodos de solución utilizados por los autores para el problema de la programación del mantenimiento de la generación; se pueden encontrar varias técnicas de solución en un solo artículo, ya sea porque se buscaba realizar comparaciones entre varios métodos para saber cuál era el que mejor se acercaba a una respuesta adecuada y exacta, o porque se planteó la combinación de varias técnicas de solución para resolver el problema. Los métodos de solución se pueden clasificar en dos grandes grupos, uno es el que agrupa los métodos exactos, mientras que el otro agrupa los métodos no exactos.

3.2.6. Sitio web

En el sitio web se encuentran los enlaces de cada artículo respecto a la base de datos a la cual pertenecen. Algunos artículos tienen acceso libre, otros como los de IEEE Xplore y Science Direct permiten leer el resumen del artículo y otros como los de Springer Link requieren tener un usuario para poder acceder al contenido. Sin embargo, los autores de este trabajo tendrán a disposición los artículos usados para quien requiera de alguno de ellos vía correo electrónico.

3.2.7. Base de datos

En la casilla de base de datos básicamente se especifica si el artículo pertenece a IEEE Xplore, Science Direct o Springer Link.

3.2.8. Análisis de información y conclusiones

Luego de la búsqueda y descarga de los 135 artículos, se procedió a clasificarlos en una tabla en el programa Excel de Microsoft Office, para posteriormente realizar el respectivo análisis

sobre la base de datos obtenida y la consolidación del estado del arte de la programación del mantenimiento de la generación. En el capítulo correspondiente al análisis de datos y resultados, se podrán observar diagramas de barras, circulares y flujogramas en los que se deposita la información obtenida de la investigación realizada.

4. ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS

Para la realización de la revisión del estado del arte en la programación del mantenimiento de la generación entre los años 2008 y 2017, fue necesario seguir los pasos mostrados en el esquema de la figura 2. Inicialmente, se realizó la búsqueda de las tres palabras clave en las tres bases de datos en donde se arrojaban miles de documentos, muchos de los cuales fueron descartados por pertenecer a otras disciplinas. Para obtener los que eran realmente de interés, se restringió la búsqueda a los artículos clasificados como de ingeniería eléctrica, lo que disminuyó considerablemente el número de publicaciones. Luego de esta depuración, se leyeron minuciosamente los títulos y resúmenes de este nuevo conjunto reducido de artículos para dar con aquellos que realmente valdría la pena descargar y clasificar. Posteriormente, se procedió a una revisión milimétrica de los títulos, resúmenes, introducción y conclusiones de cada uno de los artículos filtrados que sí trataban el problema planteado en este trabajo. En la caja ubicada en la tercera posición se puede ver la cantidad de artículos por base de datos que se obtuvieron. Inmediatamente después, se tiene una casilla en la que se evidencia cuantos artículos fueron necesarios ojear totalmente para la respectiva clasificación del artículo o también artículos necesarios para el desarrollo de este trabajo de grado. En la última posición se puede observar en qué artículos fue necesario tener un enfoque riguroso por su complejidad al momento de la lectura o por los valiosos aportes que brindaron. Cabe resaltar que, en las bases de datos Science Direct y Springer Link, se descubrió que algunos artículos que hablaban sobre la programación del mantenimiento de la generación no aparecían al momento de aplicar los filtros de disciplina y tipo de publicación, por lo tanto, después de hacer la búsqueda con los filtros, se procedió a buscar aquellos artículos que eran de interés sin ningún filtro, este hecho hizo que la búsqueda fuera un poco más dispendiosa.

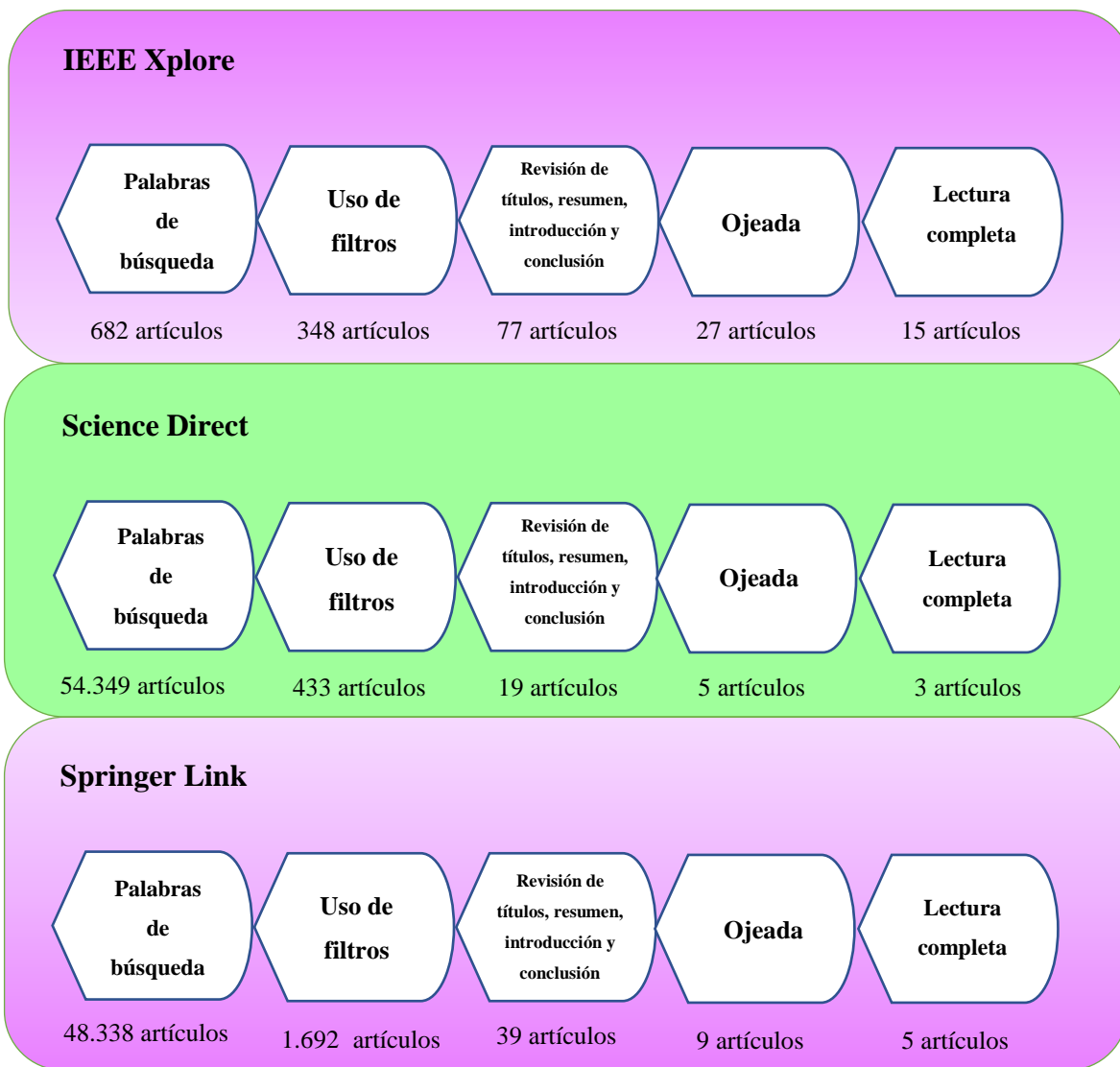


Figura 2. Esquema de selección de artículos

En el anillo de la figura 3, se puede observar con claridad el aporte porcentual que tuvo cada base de datos respecto a la cantidad de artículos descargados de cada una. Es decir, de la base de datos IEEE Xplore, el total de revistas y conferencias descargadas fue de 77, equivalente al 57% de los artículos revisados para el desarrollo de este trabajo, siendo esta base de datos la de mayor participación. Seguida de esta, se encuentra la base de datos Springer Link, con un total de 39 revistas y conferencias descargados, lo cual equivale al 29% de los artículos revisados. Por último, la base de datos con menor participación respecto a las descargas fue Science Direct, con un total de 19 artículos de investigación y de revisión descargados,

equivalentes al 14%. El aporte que se obtuvo por parte de la base de datos IEEE Xplore que fue más del 50%, en parte puede deberse a que esta base de datos se centra en investigaciones referentes a las ingenierías de Sistemas, Eléctrica, Electrónica y Física, siendo la ingeniería eléctrica la rama de interés para este trabajo, mientras que las bases de datos Science Direct y Springer Link contienen información de todas las áreas del conocimiento.

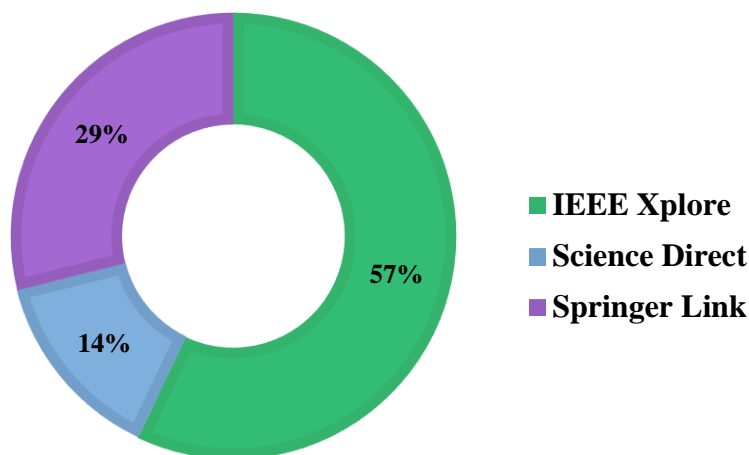


Figura 3. Anillo de porcentaje de artículos de cada base de datos.

En la figura 4, se pueden observar la cantidad de artículos publicados según el año, cabe resaltar una vez más que, el periodo elegido para la realización de este trabajo fue de 10 años, comprendidos entre enero del 2008 y diciembre del 2017. Con la creciente demanda de energía que se presenta en el mundo, la necesidad de implementar una buena programación del mantenimiento de la generación también debería aumentar, sin embargo, en la figura no se observa un aumento considerable de artículos e investigaciones publicadas al respecto con el pasar de los años.

El año en que más artículos se publicaron en total en las tres bases de datos fue en el 2016, con un total de 21 publicaciones, seguido a esto, se encuentran los años 2012 y 2017 con 19 artículos publicados cada uno. Y, en el año en que menos artículos se publicaron fue en el 2009, con un total de 7 publicaciones, todas procedentes de la base de datos IEEE Xplore.

En el año 2010, se observa un cambio brusco en el comportamiento de la gráfica, puesto que hubo un aumento del 125% aproximadamente respecto a los dos años anteriores y ya en el año 2011, la cantidad de artículos publicados vuelve a disminuir al pasar de 18 a 8 artículos.

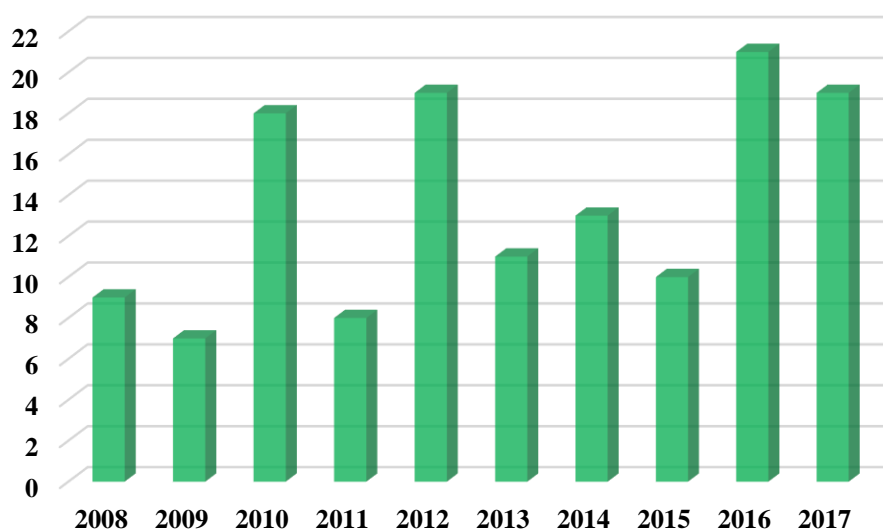


Figura 4. Número de artículos por año de publicación.

Los artículos de interés para la realización del trabajo presente eran básicamente revistas y conferencias. En la figura 5, se observa el porcentaje obtenido de cada tipo de artículo, además, no solo están las categorías de artículos de revista y conferencia, sino que también, se pueden observar dos casillas llamadas artículo de revisión y artículo de investigación, dichas casillas pertenecen a la base de datos Science Direct. Resulta que, al hacer la búsqueda se debía colocar el filtro del tipo de artículo de interés, en las bases de datos IEEE Xplore y Springer Link si fue posible realizar la búsqueda con los filtros de artículo de revista y conferencias nombrados en la sección 3.1 del capítulo 3 de este trabajo. Y por este motivo, los porcentajes de las casillas artículo de revista y conferencias de la figura 5 pertenecen a la suma de los tipos de artículos de dichas bases de datos. Sin embargo, en la base de datos Science Direct el filtro utilizado fue diferente, debido a que no aparecía una categoría en sí de revistas y conferencias, es por esto por lo que de la figura 5, los porcentajes de 2% y 12% correspondientes a artículo de revisión y artículo de investigación hacen referencia

únicamente a artículos descargados de Science Direct, siendo en total 3 y 16 artículos respectivamente.

La mayor cantidad de artículos usados son conferencias con un total del 50%, correspondiente a 67 artículos, seguido de esto, se tiene un 36% de revistas, es decir 49 artículos. Era de esperarse que, los porcentajes de artículo de revisión y artículo de investigación fueran los menores debido a que como se dijo anteriormente, hacen alusión a la base de datos Science Direct y de esta base fue de donde menos se obtuvo descargas de artículos para la realización de este trabajo.

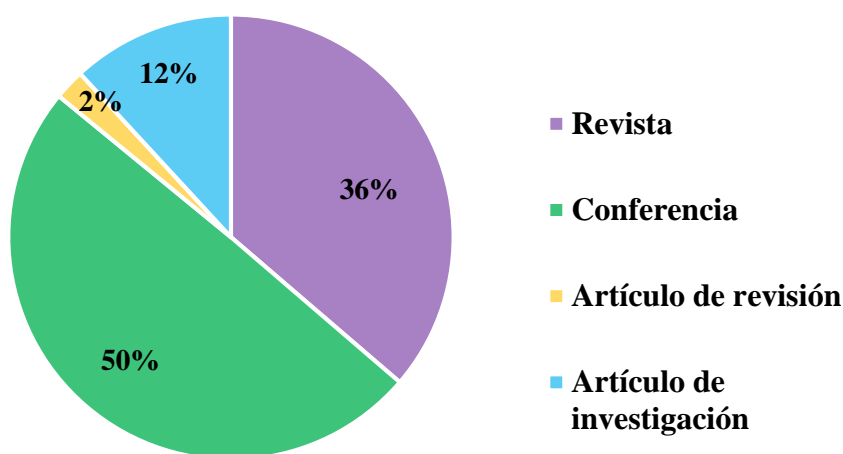


Figura 5. Diagrama de porcentajes según tipo de artículo.

Como se explicó en la sección 3.2.2 del capítulo 3 de este trabajo, la fuente hace referencia al nombre de la revista, congreso o conferencia donde fue publicado el artículo. De los 135 artículos descargados, en la figura 6 se puede observar el nombre de la fuente con la cantidad de artículos que fueron publicados allí. La mayor cantidad de artículos publicados en una misma fuente fue de ocho en total, y se tienen dos fuentes con esa misma cantidad de artículos, las cuales son “*IET Generation, Transmission & Distribution*” correspondiente a artículos descargados de la base de datos IEEE Xplore, y “*Energy Procedia*” correspondiente a artículos descargados de Science Direct. Seguido de esto, se encuentran las fuentes

“Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)” y *“IEEE Transactions on Power Systems”* con un total de siete y seis artículos publicados allí respectivamente, todos estos pertenecientes a la base de datos IEEE Xplore. La siguiente fuente encontrada fue *“The International Journal of Advanced Manufacturing Technology”* con un total de cinco artículos descargados de Springer Link. Las fuentes *“Universities Power Engineering Conference (UPEC)”* y *“Journal of Scheduling”* pertenecientes a las bases IEEE Xplore y Springer Link respectivamente cuentan con cuatro artículos descargados cada una. Seguido de esto, se encuentran las fuentes que cuentan con tres artículos publicados cada una, dos de estas fuentes pertenecen a la base de datos IEEE Xplore, las cuales son *“Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies”* y *“Power and Energy Society General Meeting”*, y la otra fuente pertenece a la base de datos Science Direct, la cual es *“Thermal Engineering”*.

Se puede observar que, la cantidad de artículos publicados en una misma fuente que más se repite es dos, en un total de ocho fuentes diferentes. De estas ocho fuentes, cinco pertenecen a artículos descargados de la base de datos IEEE Xplore, mientras que las otras tres fuentes pertenecen a artículos de Springer Link. Las cinco fuentes de IEEE Xplore son: *“Power and Energy Engineering Conference”*, *“Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)”*, *“European Energy Market (EEM)”*, *“North American Power Symposium (NAPS)”*, *“PES General Meeting | Conference & Exposition”* y *“Thermal Power Plants (TPP)”*, y las tres fuentes de Springer Link son: *“Annals of Operations Research”*, *“Journal of Intelligent Manufacturing”* y *“Dynamics in Logistics”*.

Por último, cabe aclarar algo muy importante, de la figura 6, la barra llamada “Otras” que según el gráfico solo tendría publicado un artículo no hace referencia a una sola fuente, al contrario, se refiere a todas las fuentes que solo tuvieron un artículo publicado independientemente de la base de datos. Por cuestiones estéticas del gráfico, se escogió representar todas aquellas fuentes como una sola en la barra “Otras”. En total, fueron 66 fuentes las que solo tuvieron una publicación.

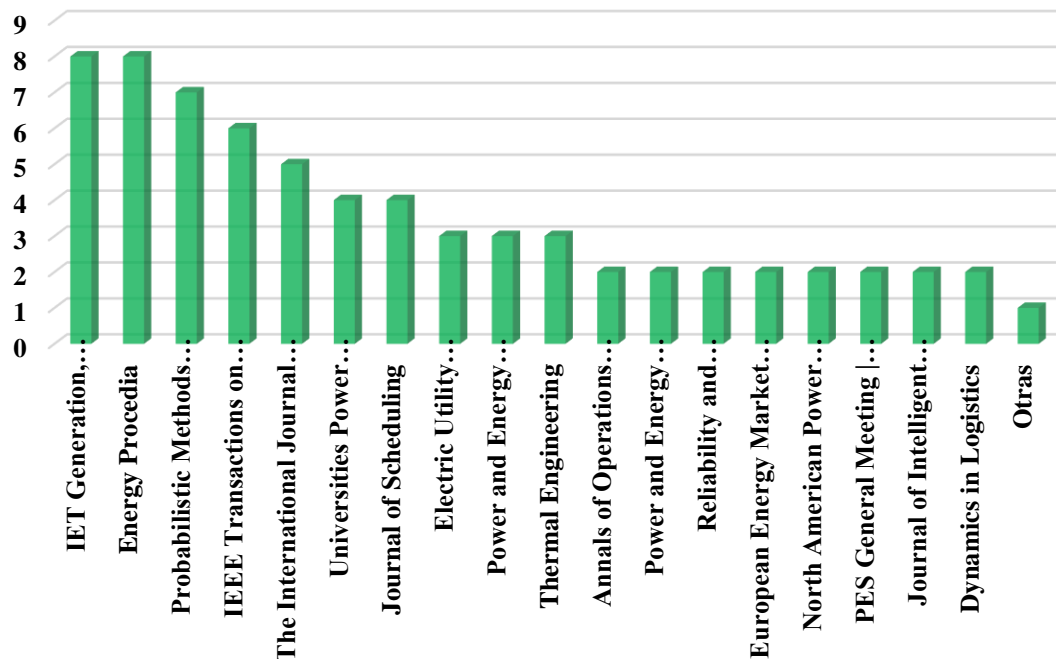


Figura 6. Número de artículos por fuente de publicación.

Conocer cuales autores han sido los que más han publicado sobre el tema de la programación del mantenimiento de la generación es importante, ya que se establece una línea, la cual se puede seguir para futuras investigaciones a medida que estos autores vayan publicando sobre el tema en un futuro. En la tabla 1, se puede apreciar cuantos artículos publicaron algunos autores entre enero del 2008 y diciembre del 2017. El máximo de publicaciones en las que participa el mismo autor es cuatro. En la primera casilla de la tabla 1 se observa el nombre de siete autores diferentes, lo que quiere decir que cada uno de estos autores participa en cuatro diferentes artículos publicados. El total de autores que participaron en la publicación de tres y dos artículos fue de 25 y 27 autores respectivamente. Y, en la casilla llamada “otros” se encuentran el resto de los autores que únicamente tienen una publicación durante los últimos diez años, que en total fueron 289 autores. Cabe resaltar que, de los 135 artículos descargados se obtuvo un total de 348 autores, este número elevado se debe a que hubo artículos en los que participaron hasta ocho autores en una misma publicación.

Autores	Artículos publicados
Y. Yare, G.K. Venayagamoorthy, Nima Mohammadi Tabari, Bahareh Hassanpour, Changyou Feng, Xifan Wang y N. Kumarappan	4
Mahdi Pirmoradian, Jaeseok Choi, K.Suresh, Hossein Daneshi, Reza Sirjani, J. P. Zhan, C. X. Guo, Q. H. Wu, G. Giftson Samuel, C. Christoher Asir Rajan, Hessam Golmohamadi, Yang Wang, Haiwang Zhong, Qing Xia, Mojgan Mollahassani-pour, Masoud Rashidinejad, Amir Abdollahi, Murat Yildirim, Xu Andy Sun, Nagi Z. Gebraeel, E. Umamaheswari, S. Ganesan, M. Abirami, S. Subramanian, Md Pauzi Abdullah	3
C.Y. Chung, G. Lu, K.P. Wong, F. Wen, Ungki Baek, Bonhui Ku, Junmin Cha, Wenchuan Wu, Boming Zhang, Yu. A. Yanchenko, Mahmud Fotuhi-Firuzabad, Ahmad Norozpour Niazi, Matti Scheu, Michael Muskulus, Maryam Ramezani, Surya Teja Kandukuri, Kjell G. Robbersmyr, Hamid Reza Karimi, B. Hadjaissa, K. Ameer, S. M. Ait cheikh, N. Essounbouli, M'hammed Sahnoun, David Baudry, Chongqing Kang, Wen-Shan Tan, Mohamed Shaaban.	2
Otros	1

Tabla 1. Número de artículos publicados por autor.

En la figura 7, se aprecia de manera gráfica el número de artículos publicado por los autores, en la cual no se logra apreciar el total de autores, es por ello por lo que se recurrió a la realización de la tabla 1, en donde sí se pueden apreciar todos los autores de una manera organizada, a excepción de los autores que participaron en una sola publicación debido a que es un número elevado.

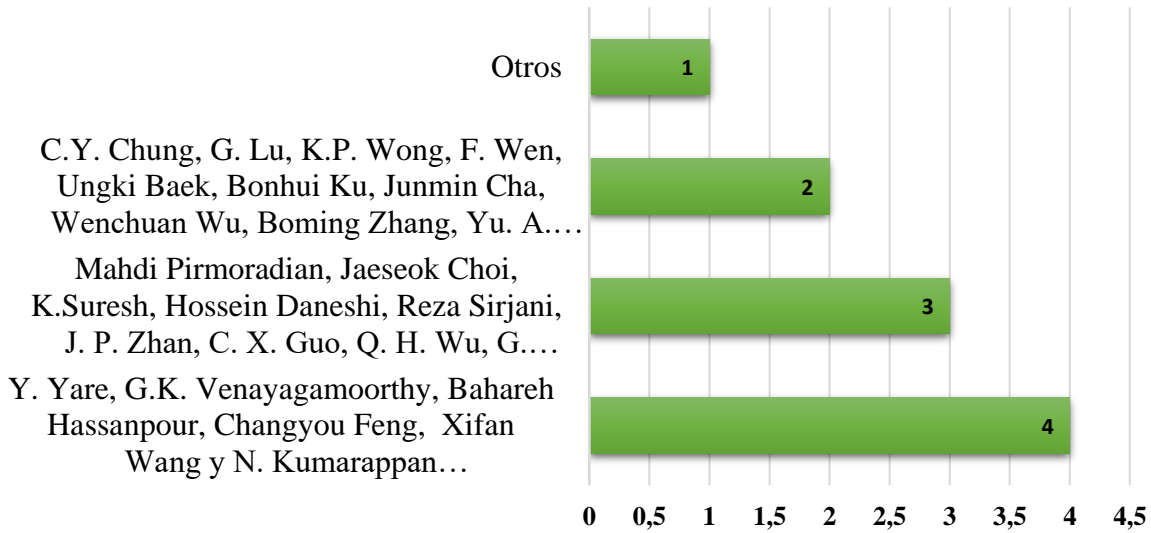


Figura 7. Número de artículos publicados por autor.

Ahora bien, la procedencia de los artículos es un factor importante para entender en que proporción se está estudiando la programación del mantenimiento de la generación en los diferentes países del mundo. Para ello se realizó una gráfica mostrada en la figura 8, la cual muestra la cantidad de artículos publicados en el país donde se encuentra la universidad o instituto de investigación al que pertenecen los autores de cada artículo. Como es de esperarse, los países más desarrollados del planeta son los más comprometidos en el tema de la programación de la generación del mantenimiento, como se puede observar en la figura 8; países como China y Estados Unidos son los que han dedicado más esfuerzos al estudio de este tema tan importante en el área de planeamiento de sistemas eléctricos, cuyo auge se espera siga aumentando en el mundo a medida que las energías renovables también se extiendan.

Hubo un total de 30 artículos en los que alguno o varios de sus autores pertenecen a universidades o institutos ubicados en China, siendo este país el de mayor participación. Este resultado no es sorpresa si se tiene en cuenta que China es el líder mundial en generación de energía eólica y solar, además, supera a Brasil en el tema de generación hidroeléctrica. El gobierno central canceló la construcción de más de 100 centrales de generación, y es que, en el año 2016 China generó más del 35% de su propia demanda de electricidad y como

consecuencia de esto, se desecharon aproximadamente 49.7 TW-hora de energía [25]. Es evidente que, para poder contar con una capacidad tan elevada de generación, China debe tener un muy buen sistema de programación del mantenimiento de la generación, y eso se ve reflejado en los artículos usados para este trabajo puesto que es el país que más se pronuncia.

En segundo lugar, se encuentran Estados Unidos e Irán, los cuales aparecen en 17 artículos cada uno en total. Seguido de ellos, están Reino Unido e India con un total de 13 artículos cada uno. Actualmente, India es una potencia energética, principalmente en generación de energía renovable, las metas que se habían propuesto en ese país específicamente para generación de energía solar eran de 20GW para el año 2022, lo cual ya fue logrado el año pasado (2017), sus expectativas siguen en aumento, pues ahora la nueva meta para el año 2022 son 100GW los cuales posiblemente si se logren cumplir y es que para poder satisfacer toda la demanda energética de ese país no podría esperarse menos respecto a generación, si se tiene en cuenta que es uno de los países más poblados del mundo, es más, se estima que para este año sea el país con más población [26]. Por otro lado, Irán es el país de mayor generación de energía renovable en el Oriente Medio, dentro de estas energías renovables se encuentran la eólica, solar, hidroeléctrica y geotérmica. De la energía eólica, cabe resaltar que, del Oriente Medio, en Irán es el único lugar que se cuenta con un centro de producción de turbinas eólicas. Se espera que un futuro no muy lejano Irán tenga la planta de energía solar más grande de Oriente Medio, con una capacidad de 100MW. Muchos países están interesados en invertir en este país para generar energía solar debido a que tiene un promedio de 2.800 horas de sol al año y porque se cuenta con el apoyo económico del gobierno para este tipo de proyectos, lo cual es muy importante. Llama la atención como este país a pesar de ser rico en petróleo y gas tiene la conciencia de invertir en energías renovables [27].

También, se hace importante aclarar que países como Chipre, Grecia, Finlandia, Suiza, Croacia, Pakistán, Israel, Bélgica, Irlanda, Canadá y Kazajistán únicamente tienen una publicación sobre el tema en los últimos diez años, claro está. De igual forma, se puede evidenciar como Colombia en los últimos diez años solo ha tenido una publicación en las bases de datos usadas en esta revisión. Específicamente, en la base de datos IEEE que en el año 2014 se realizó un aporte referente al tema, pero que se centra en el despacho hidrotérmico considerando cortes de mantenimiento [28], aun así, cuando se dice que el

sistema eléctrico colombiano es uno de los más robustos, se ve en gran medida el atraso que tiene el país respecto a lo que se está realizando en otros países. Esta situación se puede presentar de manera obvia debido a que los estudios realizados en estos diez últimos años se basan principalmente en la programación del mantenimiento de generadores eólicos y Colombia apenas hasta hace muy pocos años incursionó en esta forma de generación de energía eléctrica, tanto así, que tan solo se cuenta con una sola planta eólica ubicada en el departamento de la Guajira llamada Jepírachi, la cual tiene una capacidad instalada de 19,5MW de potencia nominal [29].

Cabe mencionar que, hay artículos que fueron realizados por autores que pertenecen a universidades o institutos de diferentes países, sin embargo, se encontraron artículos en los que todos los autores estudiaron en el mismo país y de los cuales se publicó más de un artículo, por ejemplo, los artículos procedentes de India con 30 publicaciones, Rusia y Corea con cinco publicaciones cada uno y por último con dos publicaciones cada uno se encuentran Singapur y Suecia.

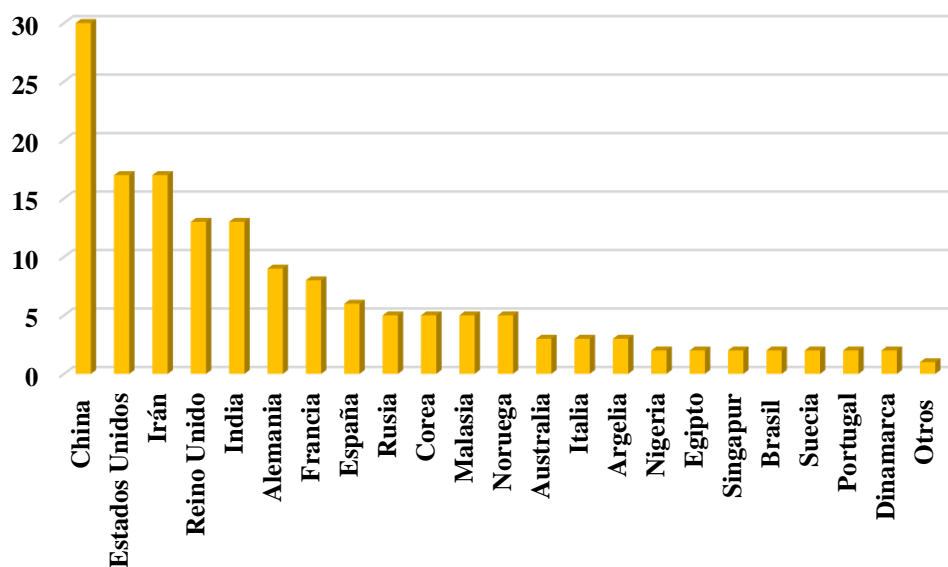


Figura 8. Procedencia de artículos por país.

En el anillo de la figura 9, se pueden observar los porcentajes de los continentes en los cuales están ubicados los países de las universidades o institutos a los que pertenecen los autores. La mayor participación ocurre en el continente de Europa con un 52% equivalente a 17 países nombrados, le sigue Asia con un porcentaje del 27%, es decir 9 países. En tercer lugar, se encuentran África y América con un total de 9% equivalente a 3 países cada uno. Por último, se encuentra el continente de Oceanía con un porcentaje del 3% correspondiente a un único país, el cual es Australia, nombrado en tres artículos. Es de destacar que sólo se encontró una publicación de Colombia, y aparte de esto, de América del Sur el único país que aparece es Brasil nombrado en dos artículos en total. Es apenas evidente el poderío de los estudios realizados en Europa y Asia en donde llevan décadas de experiencia en el la programación del mantenimiento de la generación comparado con los países de los demás continentes, tanto así que mientras estas potencias en el tema están estudiando como programar el mantenimiento de generadores de energías renovables, países de América del sur y de África siguen estudiando este tema, pero en las hidroeléctricas y en las termoeléctricas. Esto no es malo, ya que así las energías renovables sean tan amigables con el medio ambiente todavía no son un recurso poderoso como para dejar a un lado las maneras de generación más comunes y fuertes alrededor del mundo. Pero es importante, claro está, que se debe incursionar en el estudio de la programación del mantenimiento de la generación de los generadores utilizados en estas nuevas formas de generar energía eléctrica, porque es una realidad que el futuro de la generación de energía está en las energías renovables.

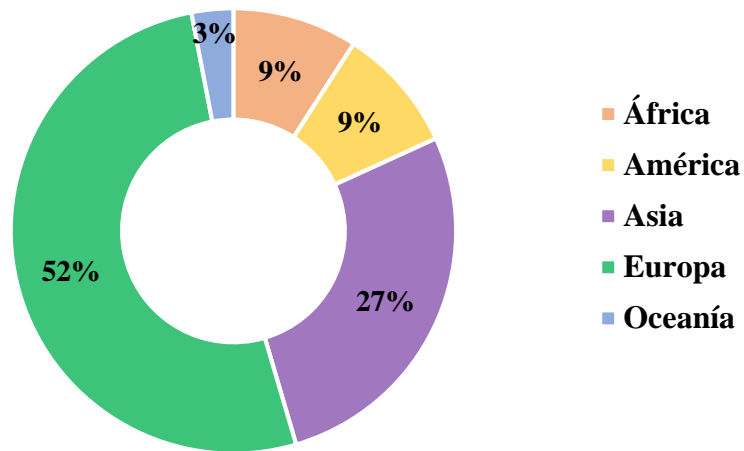


Figura 9. Anillo de procedencia de artículos por continente.

Todos los países en los que se encuentra la universidad o instituto al cual pertenece cada autor, puede observarse mejor en la tabla 2, en la cual se encuentran separados por continente.

Países	Continente
Argelia, Nigeria, Egipto	África
Colombia, Estados Unidos, Brasil, Canadá.	América
China, Irán, India, Corea, Malasia, Singapur, Pakistán, Israel, Kazajistán	Asia
Reino Unido, Alemania, Francia, España, Rusia, Noruega, Italia, Suecia, Portugal, Dinamarca, Chipre, Grecia, Finlandia, Suiza, Croacia, Bélgica, Irlanda	Europa
Australia	Oceanía

Tabla 2. Países de procedencia de los artículos ubicados por continente.

Como se explicó de manera detallada en la sección 3.2.4 de este documento, básicamente, un modelo matemático es la representación de algún problema mediante una serie de ecuaciones que describen su comportamiento. Para fines de este trabajo, en los 135 artículos descargados y clasificados se pudo encontrar un total de 88 modelos matemáticos utilizados para la solución al problema de la programación del mantenimiento de la generación. En la figura 10, se puede revisar de manera detallada la gráfica que muestra claramente algunos de

los modelos utilizados en los artículos, como también en cuantos artículos fue utilizado dicho modelo para afrontar el problema del planeamiento de sistemas eléctricos. Así mismo, se puede decir que, en un total de 60 artículos revisados en la investigación no tienen un modelo matemático para la solución de este problema, esto es debido a que estos artículos son revisiones sobre el tema o tienen algunos modelos empíricos propuestos desde el punto de vista de una coordinación de tiempos, básicamente, no siguen un patrón de ecuaciones para la programación del mantenimiento de las unidades generadoras. Como es una cantidad considerable de modelos utilizados y no es estético ubicarlos todos en una gráfica, aquellos modelos que únicamente fueron utilizados una vez en los artículos consultados para este trabajo se mencionarán a continuación: Modelo *Life-Cycle-Cost* (LCC), Estrategia evolutiva (ES), Programación Lineal de Dos Niveles Mixtos (MIBLP), Programa cuadrático mixto de 0/1, Optimización basada en enseñanza-aprendizaje (TLBO), Programación evolutiva, Optimización mixta de enteros no lineales, Programación cuadrática mixta entera (MIQP), Algoritmo híbrido que combina una búsqueda de dispersión y un algoritmo genético, Función de transferencia Box-Jenkins, Funciones de transferencia "pseudo" de parámetros dependientes del estado, Modelo ARIMA (*Autoregressive Integrated Moving Average*), Optimización monofónica (*makespan*), Optimización bi-objetivo, Modelo de evento discreto, Modelo de optimización adaptativa, Modelo probabilístico y Control predictivo del modelo (MPC). Vale la pena que sean mencionados para que estos modelos puedan ser estudiados por más autores que deseen utilizar alguno de estos modelos matemáticos en la solución de este problema del planeamiento de sistemas eléctricos. También, para el estudio de otros temas que pueden combinarse con este, como el compromiso de la unidad o la programación del mantenimiento de la generación.

En este trabajo, se presentará el modelo matemático en la programación del mantenimiento de la generación más común en los últimos diez años. El modelo es el Algoritmo Genético (GA) que se puede observar en el anexo 2 de este trabajo. Es importante decir que a pesar de que varios artículos utilicen el mismo modelo para la solución del problema, pueden variar algunos factores como costos de combustibles, incertidumbres debido a las cargas y al combustible, pagos de generadores, el efecto en la fiabilidad del sistema debido a retrasos en el mantenimiento de los generadores, etc. Estos ligeros cambios entre uno y otro se ven

reflejados en la función objetivo o en las restricciones que los autores hayan decidido adoptar, otro factor que influye sería la técnica de solución que será explicada de manera detallada más adelante. Por ejemplo, Moein Manbachi, Faezeh Mahdloo y Mahmood-Reza Haghifam de las Azad University y Tarbiat Modares University de Irán, presentan una solución para el problema de la programación del mantenimiento de unidades generadoras en entornos desregulados, este es un aspecto importante ya que otros autores podrían realizar un modelo en el que el entorno de este sea regulado. Que el entorno sea desregulado significa que cada compañía de generación desea optimizar los pagos mientras que el operador independiente del sistema exige cumplir ciertos criterios de confiabilidad. De esta manera los autores presentan en su artículo el modelo matemático de algoritmo genético para la programación del mantenimiento ya que ellos dicen que "Las compañías generadoras establecen sus estrategias para participar en el mercado del mantenimiento considerando las incertidumbres de la carga y de combustible, además de considerar los comportamientos de otras compañías" [30]. Dicho esto, en el anexo 2 de este documento se encuentra el modelo matemático utilizado por estos autores para cumplir su objetivo de darle solución a este problema.

Al revisar la función planteada en el modelo, se puede ver en el listado el significado de cada una de las variables utilizadas dentro de la función a optimizar. Es importante decir que los autores lo que buscan con esta función objetivo es maximizar las ganancias de las compañías generadoras confiando en minimizar los costos en los mercados de subastas y mantenimiento para lograr una solución admisible. Mientras que, Changyou Feng y Xifan Wang, Fellow de la Xi'an Jiaotong University en China [31], a pesar de que también utilizan una programación de mantenimiento de unidades generadoras en un entorno desregulado y que también utilizan el algoritmo genético en su modelo, se puede evidenciar en su artículo que sus funciones objetivo son totalmente distintas, a pesar de que tengan el mismo enfoque en tanto a la reducción de costos de mantenimiento. De igual forma, se puede decir que al igual que las funciones son distintas sus restricciones también lo son. Aunque el propósito de este trabajo no es la presentación de los modelos matemáticos sino básicamente la identificación de los diferentes modelos utilizados en la solución de este problema en los últimos diez años en la literatura recorrida es importante contextualizar un poco al lector de la manera en que se

establece un modelo matemático para la solución en el problema de la programación del mantenimiento de la generación.

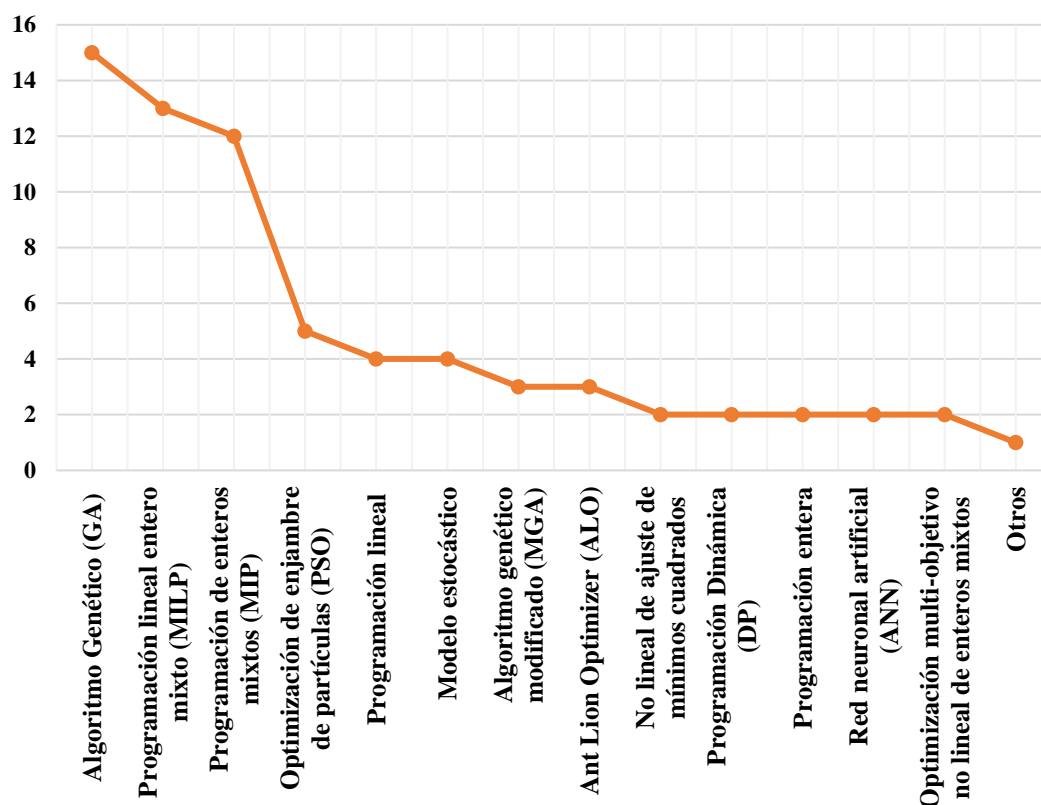


Figura 10. Modelo matemático por número de artículos

Al analizar los 135 artículos descargados para la realización de este trabajo, se encontró que tan solo 19 artículos no especificaban una técnica o método de solución utilizada, mientras que en los 116 artículos restantes sí se pudo obtener información al respecto. En la tabla 3, se pueden observar los nombres de las técnicas o métodos de solución que se usaron en los 116 artículos y, además, aparece en cuántos artículos se implementaron.

Cabe resaltar que, hubo artículos en los que se usó más de una técnica o método de solución, por ejemplo, los autores Y. Yare y G. K. Venayagamoorthy en una de sus publicaciones compararon dos métodos, estos son: Algoritmo de evolución diferencial (DE) el cual es un

método de optimización heurística y algoritmo de optimización de enjambre de partículas discretas modificado (MDPSO) el cual es una estrategia evolutiva de búsqueda óptima en entornos complejos. Al observar en la tabla 3, dichos métodos fueron empleados en dos y tres artículos diferentes respectivamente. Estos autores, utilizaron esos dos métodos para dar solución al problema de la programación del mantenimiento de la generación en un sistema de energía nigeriano, el cual tenía un total de 49 unidades de generación, con el fin de obtener un sistema económico y confiable [32].

También, los autores Yongqing Feng, Peng Li y Hao Wang en una de sus publicaciones [33], utilizaron en total cuatro métodos diferentes: Método de descomposición de Benders, método de enumeración implícito Balas mejorado, método que integra la teoría de credibilidad y el método Cumulant. Básicamente, lo que hicieron fue crear un enfoque de la teoría de la credibilidad para la programación del mantenimiento de unidades hidrotérmicas, esto lo lograron usando primero el método de descomposición de Benders para dividir el problema en dos partes, la primera llamada problema principal de mantenimiento y la segunda un sub-problema de operación. Para resolver el problema principal, se usó el método de enumeración implícita de Balas mejorado y para resolver el sub-problema, usaron los métodos de la teoría de credibilidad y Cumulant.

En la tabla 3, se observa que hubo cuatro técnicas o métodos de solución usadas en tres artículos diferentes cada una, otros 15 métodos o técnicas usados en dos artículos cada uno y, por último, fueron más las técnicas o métodos que se usaron en solamente un artículo, 93 en total. Hablar de todas estas técnicas o métodos no es el propósito de este trabajo, sin embargo, si se tomarán en cuenta las técnicas más usadas, en este caso fueron el recocido simulado, el algoritmo de optimización de enjambre de partículas discretas modificado (MDPSO), la programación de 0-1 enteros y la recolección de información.

D. Anghinolfi, et al, proponen un enfoque de optimización en el cual se descompone el problema del manejo a gran escala de la energía con el fin de optimizar los planes de producción, de programación de mantenimientos y mantener bajos costos de producción, esto lo hicieron implementando herramientas metaheurísticas, programación lineal entera mixta y el uso del recocido simulado [34]. Por otro lado, Y. Yare, et al, hicieron una publicación

[35], en la cual implementaron un algoritmo usando la optimización de enjambre de partículas discretas modificado (MDPSO) para realizar una programación de mantenimiento preventivo de unidades de generación, con el fin de obtener un sistema económico y confiable. Este algoritmo lo compararon con el algoritmo genético (GA) y la optimización discreta de enjambre de partículas (DPSO), lo que obtuvieron fue que el algoritmo propuesto (MDPSO) tuvo índices de confiabilidad del sistema mucho más altos que los otros dos algoritmos. Así mismo, Nima Mohammadi Tabari, et al, utilizaron el método de programación entera 0-1 para realizar una programación óptima del mantenimiento preventivo de las unidades generadoras, con el objetivo de mantener las unidades lo más rápido posible. Encontraron una solución óptima y un total de otras siete posibles soluciones [36]. Por último, el autor C.J. Hockley utiliza la recolección de la información con el fin de producir un régimen de mantenimiento esclarecedor para parques eólicos, el autor establece que, las comunidades de usuarios o propietarios no tienen en cuenta la importancia de realizar periódicamente un mantenimiento óptimo a los parques eólicos para así, aumentar la eficiencia y disponibilidad de estos [37].

Técnica o método de solución	Número de artículos en los que aparece
Recocido simulado, Algoritmo de optimización de enjambre de partículas discretas modificado (MDPSO), Programación de 0-1 enteros, Recolección de información	3
Algoritmo de evolución diferencial (DE), Método de iteración Gauss-Newton, Metodología probabilística, Método de búsqueda difusa, Modelo de programación de mantenimiento integrado (IMS), Método estocástico, Método de descomposición de Benders, Técnica del Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM), Mantenimiento basado en la condición (CBM), Lógica difusa, Relajación inducida, Técnica de interrupción, Modos de falla y análisis de efectos (FMEA), Método de Montecarlo, Revisión de las técnicas de inspección	2
Equidad de coordinación, Encuesta biográfica, Mantenimientos preventivos en los periodos normativos promediado, mantenimientos de emergencia y mantenimientos en función del estado del equipo técnico, La capacidad de reserva nivelada (LRC), Enfoque de recocido simulado refinado paralelo	1

(PRSA), Optimización de Colonia de Hormigas, Metodología integrada con tres bloques funcionales, Método de Monte Carlo de muestreo de hipercubo en latín (LHS-MC), Método Lambda-iteration (LI), Metodología basada en la tecnología MAS (sistemas multi-agente), Coordinación de tres pasos, Método Support Vector Clustering (SVC), Mercado de electricidad liberalizado, Método Fuzzy, Modelo de GenCo, Hill Climbing Technique (HCT), Análisis de árbol de fallas (FTA), Secuencia de pasos, Esquema iterativo de coordinación, Modelo de intensidad proporcional generalizada (GPIM), Algoritmo de selección CLONAL, Técnica de programación lineal entera mixta 0/1, Tecnologías de la información de la clase EAM (Enterprise Asset Management), Modelo de tasa de fallas desacopladas, árbol de decisiones y formulación lineal de enteros mixtos, Planes de gestión del ciclo de vida (LCM), Programación de generación restringida de emisión (GSP), Modelo de seguridad limitada, Inteligencia artificial, Método de riesgo nivelado probabilístico, Modelado de fallas y reparación, Técnicas de recopilación de necesidades (es decir, entrevistas, informes, etc.), Formulación estocástica con una distribución discreta para variables aleatorias, Ejecución paralela de las actividades, Técnicas heurísticas, Heurística codiciosa y una red de flujo, Método MATHDEC, Programa matemático con restricciones de equilibrio (MPEC), Método determinístico, Técnica de análisis de bienestar y nivelación de la salud, Procesos de Poisson homogéneos (HPP) y procesos de Poisson no homogéneos (NHPP), Modelo multi-estado, Modelo de optimización multiobjetivo, Función de Distribución Acumulativa (CDF), Modelo de predicción ANN multicapa, Modo de coordinación entre GENCO y cargas modificables, método de porcentaje fijo, método de unidades individuales, Método de diferencia de oferta de demanda, Análisis de firma de voltaje (VSA), enfoque vectorial de parque mejorado (EPVA), Análisis de firma actual (CSA), Sistema informático de planta (PCS), Flujo de potencia óptimo (OPF) compatible con el mecanismo del mercado, Método de detección de fallas para la turbina eólica principal, Optimizador de búsqueda grupal con múltiples productores (GSOMP), Metodología de algoritmo de salto de rana aleatorio modificado, Metodología para la programación óptima de mantenimiento de unidades generadoras, Principio estadístico de análisis de series de tiempo, Minimizar el tiempo de programación de mantenimiento, Mantenimiento sistémico y correctivo, Algoritmo de decisión multicriterio, Uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV), Ahorro y optimización de la vida útil, Análisis de datos de sensor de última generación, Transformación de restricciones, Programa de enteros mixtos de dos etapas, Método lexicográfico, Modelo de compromiso de

unidad, Algoritmo metaheurístico, Método de agrupamiento (DBScan), método de clasificación (SVM) y sistema SCADA, Técnica de reformulación disyuntiva proyectada (PDR), Modelo meteorológico de cadena de múltiples parámetros de Markov, Modelo de simulación NOWIcob O&M, Proceso de Decisión Semi-Markoviano (SMDP), Método de predicción de fiabilidad, Producción de potencia estocástica, Arquitectura conceptual para la gestión de la salud, Mantenimiento preventivo (PM), Modelo económico de cargas sensibles, Modelo de Cournot, Metodología de análisis predictivo, Programación limitada por azar (CCP), Indicadores clave de rendimiento (KPI), Métodos de Búsqueda de Vecindad Variable (VNS), Monitoreo de la condición de la vibración (VCM), Tecnología de análisis Big Data, Análisis morfológico, Algoritmo genético de clasificación no dominado (NSGA-II), Algoritmo de enjambre adaptable de partículas discretas (ADPSO), Algoritmo de colonia artificial de abejas (ABC), Enjambre de Partículas Híbrido, Método de enumeración implícito Balas mejorado, Método que integra la teoría de credibilidad y el método Cumulant	
---	--

Tabla 3. Técnicas o métodos de solución usados en los artículos.

De los 135 artículos usados en este trabajo, solo en 58 artículos, es decir en el 43% de los artículos aproximadamente, los autores especifican el *software* que utilizaron para dar solución a la técnica o modelo matemático empleado. En el diagrama circular de la figura 11, se puede observar cuales *softwares* fueron los más empleados en los 58 artículos.

Los *softwares* que más se emplearon fueron Matlab y Cplex, con un total del 38% cada uno, es decir que en 22 artículos se usó la herramienta de *software* matemático Matlab y en otros 22 artículos se usó el *software* de optimización Cplex. Con un porcentaje de 3% y usados solo en 2 artículos cada uno, se encuentran el *software* NetLogo, el cual es un entorno de modelado programable de agentes múltiples y el sistema de modelado algebraico general GAMS. Todos los *softwares* empleados para la solución de problemas, en este caso para la programación del mantenimiento de la generación, son importantes y prestan una herramienta poderosa, pero sin duda alguna GAMS es uno de los *software* más potentes para la solución de estos problemas ya que brinda la facilidad de escoger entre diferentes técnicas, lo cual es bueno ya que se puede visualizar con que técnica se encuentra una solución más optima en la solución de los diferentes problemas planteados, específicamente en el

planeamiento de sistemas eléctricos que es el área de estudio de este trabajo. Cabe mencionar que, en algunos de los artículos en los cuales se usó el *software* Cplex, los autores mencionaron que escogieron como *software* de solución GAMS y especificaron que el optimizador empleado fue Cplex. Los 2 artículos que aparecen con simplemente *software* empleado GAMS fue porque los autores no especificaron cuál técnica utilizaron y solo nombraron dicho *software*.

Por último, se usaron otros 10 diferentes *softwares* cada uno en un artículo diferente y agrupados en la porción llamada “Otros” de la figura 11, los cuales son: *Software* FICO-Xpress, *Software* Industrial LINGO, *Software* CIS, *Software* de optimización de mantenimiento preventivo (PM), *Software* Excel VBA, *Software* CMSS y MIMIR, *Software* de mantenimiento SMIT, *Software* ApmOptimizer, *Software* PPDS y *Software* AnyLogic.

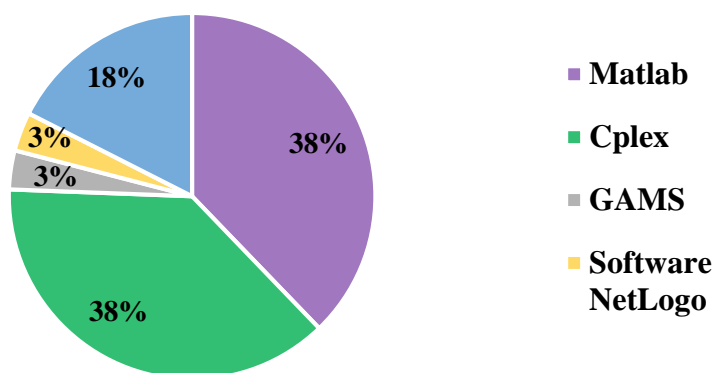


Figura 11. Diagrama de *software* empleado en los artículos.

Los *softwares* mencionados anteriormente fueron empleados para codificar diferentes técnicas, métodos de solución o modelos matemáticos en los artículos. Todas estas se condensan en la tabla 3, la cual se hizo con el fin de hacer patente que un mismo *software* o programa puede utilizarse para codificar y resolver distintos problemas y utilizando diversos modelos matemáticos y distintos métodos de solución.

Técnica/método de solución y/o modelo matemático	Software
Algoritmo de optimización de enjambre de partículas discretas modificado (MDPSO), Coordinación de tres pasos, Modelo Life-Cycle-Cost (LCC), Modelo de programación de mantenimiento integrado (IMS), Algoritmo Genético modificado (MGA), Método de riesgo nivelado probabilístico, Enjambre de partículas (PSO), Modelado de fallas y reparación, Programación de 0-1 enteros, Optimización basada en enseñanza-aprendizaje (TLBO), Algoritmo Genético (GA), Método determinístico y estocástico, Enjambre de Partículas Híbrido, Programación Evolutiva, Procesos de Poisson homogéneos (HPP), procesos de Poisson no homogéneos (NHPP), Modelo estocástico, Modelo de predicción ANN multicapa, Función de Distribución Acumulativa (CDC), Metodología de algoritmo de salto de rana aleatorio modificado, Lógica difusa, Algoritmo metaheurístico, Ant Lion Optimizer (ALO), Producción de potencia estocástica, recocido simulado, Programación lineal entera mixta (MILP), control predictivo del modelo (MPC).	Matlab
Modelo de tasa de fallas desacopladas, árbol de decisiones, Técnica de programación lineal entera mixta 0/1, Formulación estocástica con una distribución discreta para variables aleatorias, Programa cuadrático mixto de 0/1, Programación entera, Ejecución paralela de las actividades, Método MATHDEC, Método de optimización de recocido simulado, Programa matemático con restricciones de equilibrio (MPEC), Método de descomposición de Benders, Programación de 0-1 enteros, Programación lineal (PL), Modo de coordinación entre GENCO y cargas modificables, Algoritmo genético modificado (MGA), Relajación inducida, Programación mixta de enteros (MIP), Transformación de restricciones, Técnica de interrupción, Método lexicográfico, Modelo de compromiso de unidad, Técnica de reformulación disyuntiva proyectada (PDR), Modelo económico de cargas sensibles, Modelo de Cournot	Cplex
Modelo de seguridad limitada, Programación mixta de enteros (MIP)	GAMS
Algoritmo de decisión multicriterio, Mantenimiento sistémico y correctivo	Software NetLogo
Modelo de GenCo, Programación de enteros mixtos (MIP), Mercado de electricidad liberalizado, Tecnologías de la información de la clase EAM (Enterprise Asset Management), Planes de gestión del ciclo de vida (LCM),	Otros

Técnicas heurísticas, Algoritmo Genético (GA), Ahorro y optimización de la vida útil, Modelo de evento discreto	
---	--

Tabla 4. Técnica, método o modelo matemático de solución codificado en cada *software*.

5. TRABAJOS FUTUROS

Este trabajo servirá para estudios en diversas aplicaciones en el área del planeamiento de sistemas eléctricos principalmente en el tema de la programación del mantenimiento de la generación. Primordialmente, será de ayuda para futuros trabajos que se realizan en el grupo de investigación de la Universidad Tecnológica de Pereira. Es apenas obvio que también lo será para cualquier tipo de persona que necesite la información ya que ésta será publicada con acceso abierto a todo tipo de público.

Las personas que deseen profundizar alguna investigación en particular podrían basarse en este documento, ya que por ejemplo para algún lector sería importante si quisiera realizar o mejorar algún modelo matemático de los ya existentes, podría ubicar de manera sencilla y rápida los documentos que hablen de su modelo de interés. Igualmente, para la técnica de solución del problema.

Un posible trabajo futuro como complemento al presentado en este documento, sería completar la revisión del estado del arte de la programación del mantenimiento de la generación en un periodo de tiempo más amplio y no solo en los últimos diez años, además, se podrían agregar otras bases de datos o concentrarse en uno de los campos como el de los métodos de solución para presentarlos con todo detalle.

6. CONCLUSIONES

En los últimos diez años, los estudios acerca de la programación del mantenimiento de la generación se han enfocado alrededor del mundo en los generadores utilizados en las energías renovables, principalmente generadores eólicos y plantas nucleares. Lo cual resultó un descubrimiento importante para los autores de este documento, ya que en la sociedad en que ellos se encuentran estas formas de generación son poco comunes. De igual manera, el propósito de este trabajo de grado es proponer una herramienta que pueda facilitar el trabajo de futuras investigaciones y poder así incursionar en los temas de la actualidad en el mundo, sin olvidar que es complicado ya que quizá no se disponen de los recursos necesarios para poder implementar los estudios que se realicen en los trabajos. Si existiera una mayor inversión del estado en temas educativos se podría contar con instalaciones apropiadas para un mejor estudio de estos temas que son tan importantes hoy en día, especialmente por tratarse de energías renovables que son amigables con el medio ambiente, algo que es de suprema importancia debido a los altos niveles de contaminación por parte de los sistemas más grandes del planeta, como lo son el sistema de transporte y el sistema eléctrico.

A pesar de que este documento plasme el tema de GMS en los últimos diez años, los inicios de las publicaciones en las bases de datos estudiadas datan en los años setenta, abriendo un panorama importante para este tema en el área del planeamiento de sistemas eléctricos.

Con el desarrollo de este trabajo, se pudo analizar que, hay otros países que se han tomado seriamente el tiempo de buscar una solución óptima al problema planteado en este trabajo y fue bastante sorprendente notar que, en las tres bases de datos escogidas, consideradas como unas de las más importantes, de América del Sur únicamente habían tres artículos publicados, dos de Brasil y uno de Colombia, lo cual es de mucho orgullo puesto que los tres autores del artículo procedente de Colombia son de la Universidad Tecnológica de Pereira y una de ellas es la directora de este trabajo de grado, María Victoria Ramírez, lo cual hace constar que este trabajo fue revisado y guiado por una persona que conoce a profundidad el tema. Sin embargo, el hecho de que sean tan pocas publicaciones provenientes de América del Sur deja mucho qué pensar y resalta aún más que este tema es bastante importante puesto que en los

países más desarrollados se han llevado a cabo tantas investigaciones y trabajos al respecto. Se espera que este trabajo sea utilizado para empezar a indagar más en el tema y que inspire y llame la atención de todos los que aún no han considerado la programación del mantenimiento de la generación como un tema fundamental de estudio para contar con un sistema eléctrico confiable.

Bibliografía

- [1] M. S. Ana, “Planeación del mantenimiento anual de las unidades de generación en sistemas hidrotérmicos usando heurísticas,” Dept. Elect. Eng., Univ. Tecnológica, Pereira, Colombia, 2013.
- [2] XM. *Informe de Operación del SIN y Administración del Mercado 2016*. [Online]. Available: <http://informesanuales.xm.com.co/2016/SitePages/operacion/2-4-Generaci%C3%B3n-del-SIN.aspx>
- [3] Y. Zia, “Maintenance Scheduling: Description, Literature Survey, and Interface with Overall Operations Scheduling,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, pp. 2770-2779, Aug. 1982.
- [4] La Opinión, (2016, Jun 25). *Hidroeléctrica de Guatapé volvió a operar al 100%* [Online]. Available: <https://www.laopinion.com.co/colombia/hidroelectrica-de-guatape-volvio-operar-al-100-114338#OP>
- [5] Dinero, (2016, Mar 3). *Apagón inminente: Colombia al borde del corto circuito* [Online]. Available: <http://www.dinero.com/edicion-impresa/caratula/articulo/apagon-de-energia-en-colombia-en-2016-parece-inminente-caratula-de-dinero/220975>
- [6] T. Osnaider, (2016, Mar 28). *Unidad reparada de Termoflores entró en operación* [Online]. Available: <https://www.elheraldo.co/economia/unidad-reparada-de-termoflores-entro-en-operacion-251084>
- [7] XM. *Capacidad efectiva por tipo de generación*. [Online]. Available: <http://paratec.xm.com.co/paratec/SitePages/generacion.aspx?q=capacidad>
- [8] EcuRed. *Mantenimiento eléctrico* [Online]. Available: https://www.ecured.cu/Mantenimiento_el%C3%A9ctrico
- [9] G. Q. José, *Producción y Generación de Energía Eléctrica* [Online]. Available: <http://www.mty.itesm.mx/etie/deptos/ie/profesores/jgomez/ie/prodgen.pdf>

- [10] M. M. Nancy, “¿Qué es el estado del arte?” *Ciencia & Tecnología Para La Salud Visual Y Ocular*, vol. 5, pp. 73-75, Dec. 2005.
- [11] M. Jorge *et al*, “Maintenance scheduling in the electricity industry: A literature review,” *ELSEVIER*, vol. 251, pp. 695-706, jun. 2016.
- [12] W. R. Christiaan *et al*, “A Technique for the Automated Scheduling of the Maintenance of Generating Facilities” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-91, pp. 137-144, Jan. 1972.
- [13] J.F. Dopazo, *et al*, “Optimal generator maintenance scheduling using integer programming” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 94, pp. 1537-1545, Sept. 1975.
- [14] Zia A. Yamayee, *et al*, “Maintenance Scheduling: Description, Literature Survey, and Interface with Overall Operations Scheduling” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, pp. 2770-2779, Aug. 1982.
- [15] Zia Yamayee, *et al*, “A Computationally Efficient Optimal Maintenance Scheduling Method” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, pp. 330-338, Feb. 1983.
- [16] B. Hadjaissa *et al*, “Bi-objective optimization of maintenance scheduling for power systems,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 85, pp. 1361-1372, Nov. 2015.
- [17] Z. Jun-peng *et al*, “Generation maintenance scheduling based on multiple objectives and their relationship analysis,” *J Zhejiang Univ-Sci C*, vol. 15, pp. 1035-1047, Nov. 2014.
- [18] J.Eygelaar, *et al*, “Generator maintenance scheduling based on the risk of power generating unit failure” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 95, pp. 83-95, Feb. 2018.
- [19] PeymanMazidi, *et al*, “Profit-maximization generation maintenance scheduling through bi-level programming” *European Journal of Operational Research*, vol. 264, pp. 1045-1057, Feb. 2018.

- [20] Springer. *Tipos de artículos de revistas*. [Online]. Available: <https://www.springer.com/la/authors-editors/tutoriales-de-autores-y-revisores/writing-a-journal-manuscript/types-of-journal-articles/12022874>
- [21] Tecnológico de Monterrey. *Artículos de Conferencia*. [Online]. Available: <https://repositorio.itesm.mx/handle/11285/345355>
- [22] C. Lidia, C. Luis. *La redacción y presentación de los artículos de investigación*. [Online]. Available: <http://www.revistalatinacs.org/presentacion.pdf>
- [23] O. S. Angela, *et al*, (2008). *El artículo de revisión* [Online]. Available: https://www.uv.es/joguigo/valencia/Recerca_files/el_articulo_de_revision.pdf
- [24] Apuntes de clase Operación de sistemas eléctricos. *Introducción a la optimización*. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [25] V. D. Andrew. (2018, Mar 10). *Trump deja vía libre a China y las energías verdes* [Online]. Available: <https://www.economista.com.mx/internacionales/Trump-deja-via-libre-a-China-y-las-energias-verdes-20180310-0004.html>
- [26] G. B. Pablo. (2018, Feb 14). *India ha alcanzado sus objetivos en energía solar fijados para 2022* [Online]. Available: <https://blogthinkbig.com/india-ha-alcanzado-sus-objetivos-en-energia-solar-fijados-para-2022>
- [27] B. Tomás. (2017, Jul). *Irán impulsa su apuesta por las energías renovables* [Online]. Available: <https://www.renovablesverdes.com/iran-empieza-apuesta-las-energias-renovables/amp/>
- [28] R. M. María Victoria, *et al*, “Middle termed hydrothermal dispatch considering maintenance outages using heuristics,” in *Transmission & Distribution Conference and Exposition - Latin America (PES T&D-LA)*, 2014 © IEEE. doi: 10.1109/TDC-LA.2014.6955268.
- [29] EPM. *Jepírachi: una experiencia con la comunidad indígena Wayuu de la Alta Guajira colombiana* [Online]. Available:

<https://www.epm.com.co/site/documentos/mediosdecomunicacion/publicacionesimpresas/jepirachi/LibroJepirachienespanol.pdf>

[30] M. Moein, *et al*, “A new solution for maintenance scheduling in deregulated environment applying Genetic Algorithm and Monte-Carlo Simulation,” in *Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*, 2010 © IEEE. doi:10.1109/PMAPS.2010.5528314.

[31] S. Dipti, *et al*, “Generator maintenance scheduling with hybrid evolutionary algorithm,” in *Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*, 2010 © IEEE. doi: 10.1109/PMAPS.2010.5529004.

[32] Y. Yare, *et al*, “Comparison of DE and PSO for generator maintenance scheduling,” in *Swarm Intelligence Symposium*, 2008 © IEEE. doi: 10.1109/SIS.2008.4668285.

[33] F. Yongqing, *et al*, “Hydro-thermal generator maintenance scheduling accommodating both randomness and fuzziness,” in *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, 2011 © IEEE. doi: 10.1109/DRPT.2011.5993989.

[34] D. Anghinolfi, *et al*, “A Matheuristic Algorithm for a Large-Scale Energy Management Problem,” in *Large-Scale Scientific Computing*, 2012, pp. 173-181.

[35] Y. Yare, *et al*, “Optimal generator maintenance scheduling using a modified discrete PSO,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 2, pp. 834-846, Oct. 2008.

[36] T. M. Nima, “Implicit enumeration based 0–1 integer programming for generation maintenance scheduling,” in *Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering*, 2008 © IEEE. doi: 10.1109/SIBIRCON.2008.4602605.

[37] C. J. Hockley, “Wind Turbine Maintenance and Topical Research Questions,” *Procedia CIRP*, vol. 11, pp. 284-286, 2013.

ANEXO 1

Central de Generación	Ubicación Geográfica	Capacidad Instalada [MW]	Tipo de Central	Tipo de Combustible
Guatapé	Antioquia	560	Embalse	-
San Carlos	Antioquia	1.240	Embalse	-
Jaguas	Antioquia	170	Embalse	-
Playas	Antioquia	207	Embalse	-
Termoflores	Atlántico	610	-	Gas

Tabla 5. Información de algunas centrales de generación de Colombia.

ANEXO 2

A continuación, se presenta el modelo matemático del Algoritmo Genético (GA) por ser el más utilizado en los artículos descargados y clasificados para la realización de este trabajo.

Función objetivo

$$Max Z_{i,g}^{I,G} = \sum_i^I \sum_{ges}^{G,S} \left[\begin{aligned} & (Price_i - ((C_{g,s} + FC_i) \times (1 - I_{g,s,i}) \times h_{g,s,i})) - ((F_{g,s,i} + \\ & (V_{g,s,i} \times h_{g,s,i})) \times P_{max,g,s} \times (I_{g,s,i})) + (\delta_{g,s,i} \times (1 - I_{g,s,i})) - \\ & (Prob_{g,s,i} \times (I_{g,s,i}) \times \rho_{g,s,i}) - ((\mu_{g,s,i} \times ((I_{g,s,i}) \times FC_i \times P_{max,g,s}) \times \\ & h_{g,s,i}) \end{aligned} \right]$$

Donde,

$Price_i$: Pronóstico de precio semanal (\$/MW).

$P_{max,g,s}$: Potencia generada de la unidad g de los generadores (MW).

$C_{g,s}$: Función de costo de la unidad g de los generadores (\$/MW).

FC_i : Costo del combustible a la semana i (\$/MW).

$I_{g,s,i}$: Estado de mantenimiento de las unidades en la etapa t (1 si la unidad va a mantenimiento y 0 en caso contrario).

$F_{g,s,i}$: Costo de mantenimiento fijo de la unidad g de los generadores (\$/MW).

$V_{g,s,i}$: Costo de mantenimiento variable de la unidad g de los generadores (\$/MWh).

$h_{g,s,i}$: Las horas de operación de la unidad g de los generadores en la etapa i.

$\delta_{g,s,i}$: Factor de estabilidad del sistema de potencia (\$).

$\rho_{g,s,i}$: Factor por demora de mantenimiento por la unidad g en la semana i (\$).

$\mu_{g,s,i}$: Probabilidad de suministrar combustible a la unidad g en la etapa i.

Restricciones

- a. Número de tiempos de apagado para la restricción de mantenimiento:

I (52 semanas)

$$\sum_i I_{g,s,i} = 52 - D_{g,s}$$

Donde:

$D_{g,s}$: Duración de mantenimiento de la unidad g de los generadores.

- b. La carga y la restricción de igualdad de generación:

$$\sum_{g \in S}^G P_{max,g,s} \times I_{g,s,i} \geq Demand_i$$

Donde:

$Demand_i$: Demanda total de la etapa i .

- c. La restricción de duración de mantenimiento secuencial:

$$\sum_i^{I+D_{g,s}-1} 1 - I_{g,s,i} \geq \{D_{g,s} \times [I_{g,s,i-1} - I_{g,s,i}]\}$$

Donde:

$I_{g,s,i-1}$: Estado de la unidad g en la etapa $i-1$.

ANEXO 3

1. Mecanismo de coordinación de programación de mantenimiento de la unidad en el entorno del mercado eléctrico: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4580132/>
2. Programación óptima del mantenimiento del generador utilizando un PSO discreto modificado: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4663094/>
3. Programación de mantenimiento de la unidad de generación en el entorno del mercado eléctrico: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4523500/>
4. Una técnica de programación de mantenimiento de equipos de generación en sistemas de energía eléctrica desregulados: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4523575/>
5. Programación de mantenimiento de unidades generadoras en el sistema de energía eléctrica: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4562373/>
6. Enumeración implícita basada en la programación entera de 0-1 para la programación de mantenimiento de generación: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4602605/>
7. Un nuevo enfoque para la programación de mantenimiento de generadores en sistemas de energía desregulados: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4603491/>
8. Comparación de DE y PSO para la programación de mantenimiento del generador: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4668285/>

9. Optimización de la colonia de hormigas para la optimización de la planificación del mantenimiento de la planta de energía: un sistema hidroeléctrico de cinco estaciones: <https://rd.springer.com/article/10.1007/s10479-007-0277-y#citeas>
10. Programación de mantenimiento óptimo de los productores de energía considerando la falla inesperada de la unidad: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4907253/>
11. Optimización de programas de mantenimiento y extensiones para sistemas de energía compuestos utilizando algoritmo evolutivo multiobjetivo: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5270259/>
12. Programación óptima del mantenimiento de la unidad de un productor de energía bajo incertidumbre de precios: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4839970/?anchor=authors>
13. Mejora de la programación de mantenimiento de la unidad para productores de energía: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4918423/>
14. Despacho económico de una programación de mantenimiento del generador basada en la evolución diferencial de un sistema de energía: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5275178/>
15. Entorno inteligente basado en agentes para coordinar las discusiones del programa de mantenimiento: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5352826/>
16. Programación de mantenimiento de las unidades de generación teniendo en cuenta las restricciones de la red de gas: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5415750/>

17. Un mecanismo competitivo de programación de mantenimiento de la unidad en un entorno desregulado: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5357440/>
18. Una nueva solución para la programación de mantenimiento en un entorno desregulado aplicando el algoritmo genético y la simulación Monte Carlo: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5528314/>
19. Identificación probabilística de turbinas con velocidades de viento altas y bajas en un parque eólico: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5528418/>
20. Programación de mantenimiento de generadores de empresas de generación en Corea teniendo en cuenta las incertidumbres: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5528937/>
21. Modelo de interrupción aleatoria del generador para la programación de mantenimiento mensual basada en el riesgo: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5528986/>
22. Sobre los beneficios económicos del uso de Condition Monitoring Systems para la gestión del mantenimiento de los sistemas de energía eólica: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5528992/>
23. Programación de mantenimiento del generador con algoritmo evolutivo híbrido: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5529004/>
24. Programación de mantenimiento basada en la optimización de enjambre de partículas utilizando el método de riesgo nivelado y la evaluación del índice de bienestar del sistema: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5586306/>

25. Programación de mantenimiento de generación en un mercado de electricidad liberalizado: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5648847/>
26. Un nuevo enfoque difuso para la programación de mantenimiento de unidades térmicas: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5649215/>
27. Programación de mantenimiento en un entorno competitivo desde el punto de vista de GenCos: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5649230/>
28. Programación de mantenimiento de generación en un sistema de energía desregulado y mercado fluctuante: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5654427/>
29. Programación híbrida de mantenimiento de generación basada en GA / SA con restricciones de flujo de línea en el mercado de energía: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5712430/>
30. Programación de mantenimiento de generación preventiva: un enfoque de recocido simulado para usar en mercados competitivos: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5715929/>
31. Programación de mantenimiento del generador basado en fiabilidad basado en un enfoque evolutivo híbrido: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5771800/>
32. GMS considerando la incertidumbre en la energía eólica en un sistema de energía hidrotermal eólica: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5589802/>

33. Evaluación de la confiabilidad de una central eléctrica de cogeneración en fábrica textil mediante el análisis de árbol de fallas: <https://link-springer-com.ezproxy.utp.edu.co/article/10.1007/s11668-010-9410-3#aboutcontent>
34. Una metodología para cambiar los equipos de las centrales nucleares para su reparación en función de su estado técnico: <https://link-springer-com.ezproxy.utp.edu.co/article/10.1134/S0040601510050095#citeas>
35. Programación de mantenimiento de generación por coordinación de seguridad considerando mantenimiento de transformador: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5748703/>
36. Un método práctico para predecir la intensidad de falla de las unidades generadoras de energía hidroeléctrica: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5939485/>
37. Programación de mantenimiento de generadores utilizando la teoría combinada de conjuntos fuzzy y GA: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6026447/>
38. Programación integrada de mantenimiento de generadores y líneas de transmisión basadas en el optimizador de búsqueda rápida de grupos: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6039246/>
39. Un enfoque novedoso para la programación de mantenimiento de unidades de generación en el sistema de energía reestructurada: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6145345/>
40. Programación de mantenimiento de generador hidro-térmico que acomoda la aleatoriedad y la falta de claridad: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5993989/>

41. Usando 0/1 programación lineal entera mixta para resolver un problema centrado en la confiabilidad de la planificación de mantenimiento preventivo de la planta de energía: <https://link-springer-com.ezproxy.utp.edu.co/article/10.1007/s11081-011-9146-2>
42. Desarrollo e introducción de tecnologías de la información para apoyar la gestión del mantenimiento y las reparaciones en centrales nucleares: <https://link-springer-com.ezproxy.utp.edu.co/article/10.1134/S0040601511050077>
43. Optimización de mantenimiento preventivo de mitad de período Programación de interrupciones de unidades generadoras térmicas: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6144038/>
44. Mejora del rendimiento de cortes por optimización de mantenimiento preventivo: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6175440/>
45. Un enfoque genético modificado para la programación de mantenimiento de generación a largo plazo para mejorar la confiabilidad de las unidades: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6216208/>
46. Evaluación de fiabilidad de generación que incorpora programación de mantenimiento y previsión de carga: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6221426/>
47. Programación anual de mantenimiento de generación basada en precios de un productor térmico: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6254658/>
48. Desarrollar planes de gestión del ciclo de vida para los componentes de la planta de energía: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6336327/>

49. Estrategias de mantenimiento para una empresa de generación en un entorno de mercado de derechos de emisión de CO₂:
<http://ieeexplore.ieee.org/document/6345432/>
50. Programación de mantenimiento de generación global con restricciones de red, reserva de hilado, combustible y compra de energía desde el exterior:
<http://ieeexplore.ieee.org/document/6474975/>
51. Power Grid Maintenance Scheduling Intelligence Arreglo Sistema de soporte basado en la previsión de flujo de potencia:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187538921200168X>
52. Programación de Mantenimiento de Generación Preventiva a Largo Plazo con Restricciones de Red:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610211046042>
53. Programación de mantenimiento basado en la optimización de enjambre de partículas basado en el enfoque probabilístico:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705812009848>
54. Estrategias de mantenimiento para grandes parques eólicos marinos:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610212011502>
55. Sobre el desarrollo de una estrategia de mantenimiento basada en condiciones para parques eólicos mar adentro: proceso de obtención de requisitos:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610212011563>
56. Interrupciones nucleares estocásticas, relajaciones semidefinidas:
<https://rd.springer.com/article/10.1007/s10287-012-0148-0>

57. Optimización de mantenimiento con costos dependientes de la duración:
<https://rd.springer.com/article/10.1007/s10479-012-1179-1>
58. Coordinación de mantenimiento de líneas de transmisión de alta tensión y cortes de unidades NPP en un sistema experto de programación de mantenimiento:
<https://rd.springer.com/article/10.1007/s10749-012-0325-x>
59. Un enfoque basado en la programación restrictiva para un problema de gestión de energía a gran escala con diversas restricciones:
<https://rd.springer.com/article/10.1007/s10951-012-0281-1>
60. Un algoritmo metaheurístico para un problema de gestión de energía a gran escala:
https://link-springer-com.ezproxy.utp.edu.co/chapter/10.1007/978-3-642-29843-1_19
61. Programación de números enteros para la generación Programación de mantenimiento en sistemas de potencia basados en la optimización de enseñanza basada en el aprendizaje (TLBO): https://link-springer-com.ezproxy.utp.edu.co/chapter/10.1007/978-3-642-32129-0_11
62. Un enfoque EPEC para la programación de mantenimiento anual de las unidades generadoras: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6339030/>
63. Planificación multicriterio para generación eólica distribuida bajo mantenimiento estratégico: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6381506/>
64. Programación de mantenimiento de generación utilizando optimización mejorada de enjambre de partículas binarias considerando fallas de envejecimiento:
<http://ieeexplore.ieee.org/document/6614418/>

65. Generar programación de mantenimiento de la unidad en el mercado de energía basada en la equidad y la competencia: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6599676/>
66. Optimización de enjambre de partículas híbrido - Algoritmo genético y optimización de enjambre de partículas - Programación evolutiva para la programación de mantenimiento de generación a largo plazo: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6927820/>
67. Optimización del mantenimiento de parques eólicos en tierra utilizando un modelo estocástico: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895717711007886>
68. Preguntas de investigación tópicos mantenimiento de aerogeneradores: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827113005490>
69. Un enfoque de solución basado en la descomposición de Benders para el problema de programación de mantenimiento preventivo de un sistema de energía estocástico de gran escala: <https://link-springer-com.ezproxy.utp.edu.co/article/10.1007/s10951-012-0310-0>
70. Un enfoque de programación lineal entero 0-1 para programar interrupciones de las centrales nucleares: <https://link-springer-com.ezproxy.utp.edu.co/article/10.1007/s10951-013-0322-4>
71. Número especial sobre programación de mantenimiento: teoría y aplicaciones: <https://link-springer-com.ezproxy.utp.edu.co/article/10.1007/s10951-013-0357-6>

72. Un modelo multi-estado para parques eólicos considerando la probabilidad de interrupción operativa: <https://link-springer-com.ezproxy.utp.edu.co/article/10.1007/s40565-013-0025-z>
73. Planificación de mantenimiento en parques eólicos con asignación de equipos utilizando algoritmos genéticos: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6894001/>
74. Optimización multiobjetivo de programación de mantenimiento de generación: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6939295/>
75. Optimización del mantenimiento basado en la condición del sistema de turbina eólica utilizando la predicción de la degradación: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6939918/>
76. Programación de mantenimiento de generación considerando cargas intercambiables: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6993545/>
77. Cálculo y ajuste de cortes de mantenimiento de generadores de energía basados en la brecha de oferta de demanda: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7029339/>
78. Investigar los impactos de CRI en la programación de mantenimiento preventivo con restricciones de seguridad: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7040695/>
79. Equipos para Mantenimiento Predictivo en Hidro generadores: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221267161400033X>
80. Aplicación de monitoreo, diagnóstico y pronóstico en el análisis de desempeño térmico para centrales nucleares: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1738573315301431>

81. Programación de mantenimiento basado en el riesgo de las unidades generadoras en el entorno desregulado teniendo en cuenta la congestión de la red de transmisión: <https://rd.springer.com/article/10.1007/s40565-014-0058-y>
82. Detección de fallas en la turbina eólica basada en el análisis de datos SCADA utilizando ANN: <https://rd.springer.com/article/10.1007/s40436-014-0061-6>
83. Programación de mantenimiento de generación basada en objetivos múltiples y su análisis de relación: <https://rd.springer.com/article/10.1631/jzus.C1400030>
84. Desarrollo de la estrategia de RCM para turbinas eólicas utilizando la supervisión electrónica de la condición en línea: https://link-springer-com.ezproxy.utp.edu.co/chapter/10.1007/978-1-4471-4993-4_2
85. Algoritmo modificado de salto de rana aleatoria para la programación de mantenimiento de generación a largo plazo: https://link-springer-com.ezproxy.utp.edu.co/chapter/10.1007/978-81-322-1771-8_2
86. Programación óptima para el período de mantenimiento de las unidades generadoras utilizando un algoritmo híbrido de dispersión genética: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7024962/>
87. Simulación de mantenimiento de activos: el estudio de caso de un parque eólico marino: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7105158/>
88. Evaluación del rendimiento del sistema de generación de energía eléctrica a base de gas utilizando modelado de función de transferencia: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447914001658>

89. Hacia la gestión de la salud a nivel de granja de parques eólicos marinos para mejoras de mantenimiento: <https://rd.springer.com/article/10.1007/s00170-015-7616-y>
90. Optimización bi-objetivo de la programación de mantenimiento para sistemas de energía: <https://rd.springer.com/article/10.1007/s00170-015-8053-7>
91. Impacto de la refabricación de repuestos en la operación y el rendimiento de mantenimiento de las turbinas eólicas en alta mar: un enfoque multiagente: <https://rd.springer.com/article/10.1007/s10845-015-1154-1>
92. Modelado y simulación de estrategias de operación y mantenimiento para parques eólicos marinos basados en un sistema multiagente: <https://rd.springer.com/article/10.1007/s10845-015-1171-0>
93. Enfoques basados en modelos y lógica difusa para monitorizar condiciones de turbinas eólicas operativas: <https://rd.springer.com/article/10.1007/s11633-014-0863-9>
94. Planificación del control del rendimiento de la planta fotovoltaica mediante sistemas aéreos no tripulados (UAS): <https://rd.springer.com/article/10.1007/s40095-014-0149-6>
95. Administrar la vida útil del equipo en la prestación de asistencia de ingeniería para el funcionamiento de la central nuclear <https://rd.springer.com/article/10.1134/S0040601515050109>
96. Programación del mantenimiento basado en la condición del generador impulsado por sensor -Partía I: Problema de mantenimiento: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7387792/>

97. Coordinación de programación de mantenimiento de generación en mercados de electricidad: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7387795/>
98. Programación del mantenimiento basado en la condición del generador impulsado por sensor -Part II: Incorporación de operaciones: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7387798/>
99. Coordinación de programación de mantenimiento de generación y SCUC a largo plazo con restricciones de energía y N-1 contingencias: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7407718/>
100. Sólida programación de mantenimiento de generación considerando la energía eólica y las interrupciones forzadas: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7456543/>
101. Identificación de componentes críticos de plantas de energía de ciclo combinado para la implementación de mantenimiento centrado en la confiabilidad: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7485933/>
102. Efectos de cargas receptivas en la programación de mantenimiento de generadores utilizando la técnica lexicográfica: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7482932/>
103. Impacto del modo de puesta en marcha en el funcionamiento flexible de la planta de energía y el costo del sistema: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7521298/>
104. Programación de mantenimiento de generador preventivo basado en el modelo de fiabilidad determinista utilizando Ant Lion Optimizer: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7530272/>

105. Planificación de mantenimiento de unidades generadoras teniendo en cuenta la presión máxima de regulación con parques eólicos a gran escala: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7576092/>
106. Pronóstico de fallas del generador de turbina eólica usando datos SCADA: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7747914/>
107. Sistema de simulación de planificación de mantenimiento de generador fácil de usar basado en metodología probabilística: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7764189/>
108. Una programación de generación de un día con almacenamiento de energía teniendo en cuenta los costos de la rampa de ciclismo: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7951540/>
109. Investigar los principales problemas de decisión para optimizar la estrategia de operación y mantenimiento de las granjas eólicas mar adentro: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.utp.edu.co/science/article/pii/S1876610216309213>
110. Optimización conjunta de la política de dimensionamiento y mantenimiento de lotes para un sistema de dos unidades parcialmente observable: <https://link-springer-com.ezproxy.utp.edu.co/article/10.1007/s00170-016-8556-x>
111. Predicción de confiabilidad y su validación para unidades de energía nuclear en servicio: <https://link-springer-com.ezproxy.utp.edu.co/article/10.1007/s11708-016-0425-7>
112. Coordinación de mantenimiento del sistema compuesto en una red inteligente considerando la respuesta de la demanda: <https://link-springer-com.ezproxy.utp.edu.co/article/10.1007/s40866-016-0014-1>

113. Hacia la gestión de la salud a nivel de granja de parques eólicos marinos para mejoras de mantenimiento: <https://link-springer-com.ezproxy.utp.edu.co/article/10.1007/s00170-015-7616-y>
114. Optimización bi-objetivo de la programación de mantenimiento para sistemas de energía: <https://link-springer-com.ezproxy.utp.edu.co/article/10.1007/s00170-015-8053-7>
115. La planificación de los recursos de mantenimiento para el servicio de aerogeneradores marinos mediante simulación: https://link-springer-com.ezproxy.utp.edu.co/chapter/10.1007/978-3-319-45117-6_27
116. Avances tecnoeconómicos para la gestión del mantenimiento de plantas de energía solar concentrada: https://link-springer-com.ezproxy.utp.edu.co/chapter/10.1007/978-981-10-1837-4_81
117. Asignación de los recursos de respuesta a la demanda en la programación de mantenimiento preventivo restringido por seguridad a través del método MODM: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7445131/>
118. Evaluación de la capacidad de retención de la presencia de integrado de generación y transmisión de mantenimiento programación: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8118394/>
119. Programación de mantenimiento de equipos de generación y transmisión con transferencia de carga: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8274196/>
120. Análisis Predictivo Integrado y Optimización para Mantenimiento Oportunista y Operaciones en Parques Eólicos: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7849153/>

121. La optimización basada en el modelo estocástico se basa en la planificación del mantenimiento del generador preventivo utilizando Ant Lion Optimizer: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8074175/>
122. Una programación de generación de un día con respuesta a la demanda teniendo en cuenta la rampa de ciclo térmico: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8262486/>
123. Influencia de la incertidumbre estadística de las estimaciones de fiabilidad de los componentes en la disponibilidad de parques eólicos marinos: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832016308183>
124. Análisis de confiabilidad y mantenimiento del ciclo de vida de las turbinas eólicas: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217301789>
125. Programación de mantenimiento integrado rentable en sistemas de potencia que utiliza Ant Lion Optimizer: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217324141>
126. Indicadores clave de rendimiento para la operación y el mantenimiento de parques eólicos: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217353705>
127. Despacho óptimo de energía y mantenimiento de una planta de calor y energía combinada de carbón industrial en Kazajstán: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217359210>
128. Un híbrido de búsqueda vecina variable y lógica difusa para el problema de programación de Flowshop de permutación con mantenimiento predictivo: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050917314771>

129. El algoritmo híbrido MPC-MINLP para el funcionamiento óptimo de las centrales eléctricas de carbón con CO postcombustión a base de solvente2 captura: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405656116300682>
130. Fuentes de vibración y su tratamiento en centrales hidroeléctricas: una revisión: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098616304815>
131. Big Data Analytics en el Mantenimiento de Aerogeneradores Off-Shore: Un Estudio de Características de Datos: https://link-springer-com.ezproxy.utp.edu.co/chapter/10.1007/978-3-319-45117-6_12
132. Estrategias de disposición de tareas de mantenimiento en parques eólicos marinos: https://link-springer-com.ezproxy.utp.edu.co/chapter/10.1007/978-3-319-66923-6_12
133. Investigación sobre el método de optimización multiobjetivo para la decisión de mantenimiento de la central nuclear: https://link-springer-com.ezproxy.utp.edu.co/chapter/10.1007/978-981-10-2314-9_77
134. Programación óptima de las unidades generadoras de turbina eólica en función de la cantidad de daños del impulsor: https://link-springer-com.ezproxy.utp.edu.co/chapter/10.1007/978-981-10-6364-0_2
135. Estudio comparativo entre programación de mantenimiento de generación por hora y por día: https://link-springer-com.ezproxy.utp.edu.co/chapter/10.1007/978-981-10-6502-6_3